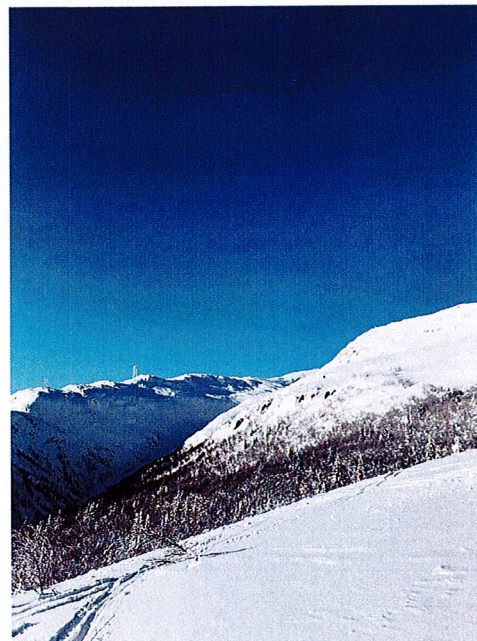


Vegetationsförändringar i skogs-tundra ekotonen 1965 - 2019

- En fjärranalys av Åreskutan



**Emma Berggren
Elin Treutiger**

**Degree of Bachelor of Science
with a major in Geography
15 hec**

**Department of Economy and Society, Human Geography &
Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2021 B-1131**



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

Vegetationsförändringar i skogs-tundra ekotonen 1965 - 2019

- En fjärranalys av Åreskutan

**Emma Berggren
Elin Treutiger**

ISSN 1400-3821

**B1131
Bachelor of Science thesis
Göteborg 2021**

Sammanfattning

Klimatförändringar har lett till att de nordliga delarna på jordklotet upplever en snabbare uppvärmningstakt än den globala medeluppvärmningen. Flertalet studier visar på att denna uppvärmning har lett till att trädgränsen och ekotonen mellan borealskog och tundra i de arktiska och subarktiska områdena på många håll avancerar till allt högre höjder och nordligare breddgrader. Samtidigt visar andra studier på att trädgränsens position snarare retirerat, står oförändrad eller att det skett en förtätning av vegetationen inom ekotonen. Dessa motsägande resultat indikerar en tämligen komplex situation där faktorerna som styr trädgränsens position och ekotonens struktur verkar vara både plats- och skalberoende och omfatta såväl abiotiska som biotiska faktorer. Generellt saknas fjärranalysbaserade studier över den svenska skogs-tundra ekotonens förändring över tid och i Jämtland är tidigare studier främst baserade på observationer eller dendrokronologiska undersökningar. Syftet med denna studie är därför att genom fjärranalys undersöka tidsmässiga förändringar inom skogs-tundra ekotonen på Åreskutans nord- och sydsluttning och vidare undersöka klimatets påverkan på förändringarna. Resultatet visar att trädgränsen sträcker sig högre upp på fjället år 2019 jämfört med 1965 och att det på båda sluttningarna kan observeras en ökad fotosyntes år 2019 jämfört med 1987. Den ökade produktiviteten går generellt att se inom hela ekotonen såväl som en expanderings mot högre höjder. Trädgränsen och ekotonens position på Åreskutans syd- och nordsluttning verkar styras av ett komplext samband mellan temperatur, nederbörd, växtsäsong, snötäcke samt topografi och markförhållanden. Till skillnad från den generella uppfattningen om att temperaturen är den största bidragande faktorn för ekotonens expansion visar resultatet i denna studie att signifikansen var störst med vinternederbörd från två föregående år. Detta indikerar att en fortsatt ökning av vinternederbörden i kombination med varmare temperaturer således skulle kunna leda till en ännu snabbare förtätning och utbredning av Åreskutans skogs-tundra ekoton.

Nyckelord: Trädgränsen, skogs-tundra ekoton, klimatförändringar, fjärranalys, Åreskutan

Abstract

Climate change has caused the northern parts of the globe to experience an even faster rate of warming than the global mean. Several studies show that this warming has driven the tree line and ecotone between boreal forest and tundra in some Arctic and sub-Arctic areas to advance to even higher altitudes and northern latitudes. On the contrary, other studies show that the position of the tree line has retreated, remained unchanged or experienced a densification of the vegetation within the ecotone. These contradictory results indicate a rather complex situation where the factors that control the position of the tree line and the structure of the ecotone seem to be both site and scale dependent as well as include both abiotic and biotic factors. In general, remote sensing-based studies on changes in the forest-tundra ecotone over time are lacking in Sweden, and in Jämtland, previous studies are mainly based on observations or dendrochronological investigations. The aim of this study is therefore through remote sensing to investigate temporal changes in the forest-tundra ecotone between 1965-2019 on the north and south side of Åreskutan mountain and further investigate the climate's impact on the changes. The results show that the tree line extends higher up the mountain in 2019 compared to 1965 along with an increase in vegetation productivity on both slopes in 2019 compared to 1987. This increased productivity can generally be seen throughout the whole ecotone as well as an expansion to higher altitudes. The tree line and the position of the ecotone on the southern and northern slopes of Åreskutan seem to be governed by a complex relation between temperature, precipitation, growing season, snow cover as well as topography and soil conditions. Contrary to the general perception that temperature is the largest contributing factor to the expansion of the ecotone, the results of this study show that the winter precipitation from the two previous years were the significantly correlated factor. This indicates that a continued increase in winter precipitation in combination with warmer temperatures could possibly lead to an even faster densification and expansion of the forest-tundra ecotone on Åreskutan.

Key words: Tree line, forest tundra ecotone, climate change, remote sensing, Åreskutan

Förord

Denna kandidatuppsats har skrivits med bakgrund av tre års geografistudier där vi utvecklat både ett naturvetenskapligt och samhällsvetenskapligt perspektiv samt införskaffat oss en djupare förståelse för sambandet mellan människa och natur och de globala och lokala utmaningar vi som samhälle står inför. Vi vill därför börja med att tacka samtliga kursledare som genom dessa tre år alla inspirerat med sina olika sakkunskaper.

Vid stunden för val av uppsatsämne ledde vårt övervägande intresse för jordens fysiska processer oss in i en mer naturgeografisk inriktning. Valet av att studera alpina vegetationsförändringar grundades sen främst i den förkärlek vi båda delar för fjällen i kombination med en nyfikenhet för platsspecifika konsekvenser av rådande klimatförändringar.

Då vi gick in arbetet utan några större kunskaper om fjällekologi kan vi såhär i efterhand konstatera att det har varit en givande och lärande process som även väckt många nya frågor att ta med in i framtiden. Först och främst vill vi därför rikta ett stort tack till docent Robert Björk som tackade ja till att vara vår handledare. Han har med sin expertis inom ämnet givit oss de goda råd och den vägledning som behövdes för att utföra detta arbete. Ett stort tack även till professor Sofia Thorsson som bidragit med stöd och strukturell vägledning under arbetets gång. Även ett stort tack till doktor Alexander Walther för sitt GIS-stöd samt docent Heather Reese för goda råd och lösningar vad gäller satellitbilder.

Sist men inte minst vill vi även tacka alla våra studiekamrater för goda åsikter och förslag gällande uppsatsen, tack för tre fina år tillsammans!

Innehållsförteckning

1. INTRODUKTION	1
2. KUNSKAPSÖVERSIKT	3
2.1 FJÄLLOMRÅDETS VEGETATIONSINDELNING	3
2.2 SUBALPIN VEGETATIONSZON	3
2.3 ALPIN TRÄDGRÄNS	4
2.4 KLIMATETS PÅVERKAN PÅ EKOTONEN	5
2.4.1 Påverkan under vegetationsperioden	6
2.4.2 Påverkan under vinterperioden	6
3. STUDIEOMRÅDE	7
3.1 GEOLOGI	8
3.2 VEGETATION	8
3.3 KLIMAT	8
3.4 MARKANVÄNDNING	9
4. DATA OCH METODER	10
4.1 DATA	10
4.1.1 Ortofoto	10
4.1.2 Nationella marktäckedata (NMD)	11
4.1.3 Satellitdata	11
4.1.4 Klimatdata	13
4.2 METODER	14
4.2.1 Förändring i trädgränsen	14
4.2.2 Vegetationsförändring	15
4.2.3 Klimatanalys	18
4.2.4 Sambandsanalys	19
4.3 METODDISKUSSION	20
5. RESULTAT	22
5.1 FÖRÄNDRING I TRÄDGRÄNSEN	22
5.2 VEGETATIONSFÖRÄNDRING	23
5.3 KLIMATANALYS	28
5.3.1 Lufttemperatur	28
5.3.2 Nederbörd	30
5.3.4 Snötäcke	31
5.3.5 Växtsäsong	31
5.4 SAMBANDSANALYS	32
5.4.1 Sambandsanalys med klimatfaktorer motsvarande år	32
5.4.2 Sambandsanalys med klimatfaktorer året innan	33
5.4.3 Sambandsanalys med klimatfaktorer två år innan	34
6. DISKUSSION	35
7. SLUTSATSER	37
8. REFERENSER	39

1. Introduktion

Klimatförändringarna har under de senaste decennierna påverkat naturliga och mänskliga system över hela jorden (IPCC, 2014). Effekterna varierar dock och ett av de områden som upplever en snabbare uppvärmningstakt än den globala medeluppvärmningen är den arktiska regionen (IPCC, 2014). Denna uppvärmning verkar på många håll leda till att den temperaturkänsliga övergångszonen mellan borealskog och tundra, även kallad skogstundra ekotonen, inom både arktiska och subarktiska områden avancerar till allt högre höjder och nordligare breddgrader (Harsch, 2009; Larsen et al. 2014). En del tidigare studier och vegetationsmodeller baserade på en fortsatt ökad uppvärmning visar på att det arktiska tundraområdet kan minska med upp till 42 % inom 100 år (Kaplan & New, 2006) samtidigt som trädgränsen i den svenska fjällkedjan kan stiga med 233–667 meter (Moen et al., 2004). Dessa beräkningar anses dock på andra håll vara överskattade (Hofgaard et al., 2012; Larsen et al. 2014).

Vegetationsförändringar har även uppmärksamats inom skogs-tundra ekotonen i Skanderna. Här har det observerats att trädgränsen stigit med omkring 200 meter över havet (m.ö.h) på vissa platser (Kullman & Öberg, 2009; Aune et al., 2011) medan andra studier visar på motsatta rörelser där trädgränsens position snarare retirerat (Callaghan et al., 2013; Van Bogaert et al., 2011) eller står oförändrad (Hedenås et al., 2016). Där trädgränsen stått oförändrad har det på vissa platser istället skett en förtätning av växtligheten inom själva ekotonen (Hedenås et al., 2016; Sturm et al., 2001). Dessa motsägande resultat antyder en tämligen komplex situation där faktorerna som styr trädgränsens position och ekotonens struktur verkar vara både plats- och skalberoende. Även studier i mindre skalor med en kombination av både abiotiska faktorer som temperatur, nederbörd, vind och solljus tillsammans med biotiska krafter som markanvändning, renbete och turism anses därför viktiga (Callaghan et al., 2013; Aune et al., 2011; Holtmeier & Broll, 2005).

Trots att det i Sverige gjorts en del forskning på vegetationsförändringar inom ekotonen i bland annat Abisko (Van Bogaert et al., 2011; Callaghan et al., 2013), Dalarna och Jämtland (Kullman & Öberg, 2009; 2015) är studierna främst baserade på observationer eller dendrokronologiska undersökningar. Hedenås et al. (2016) anser även att ett problem med de flesta studier är att de återvänder till samma studieområden där det redan förväntas förändringar vilket resulterar i att perspektivet blir snävt och att vegetationsförändringarna överskattas. För att utöka förståelsen för vegetationsförändringar och dess påverkan av

klimatförändringarna blir det därför intressant och viktigt att utföra förändringsstudier över skogs-tundra ekotonen på platser där tidigare undersökningar är begränsade. Fjärranalys anses vara en tidseffektiv metod som kan täcka större områden samtidigt som den kan ge tidsmässig och rumslig information om skiftande tundravegetation (Rees et al., 2020). Att det generellt saknas fjärranalysbaserade undersökningar över den svenska skogs-tundra ekotonens förändring över tid och att det för Åreskutan endast påträffats observationsstudier är bidragande faktorer som ligger till grund för denna studie.

Syfte

Denna studie syftar till att genom fjärranalys undersöka tidsmässiga vegetationsförändringar inom skogs-tundra ekotonen som sträcker sig mellan kalvfjäll och sluten barrskog på Åreskutan. Undersökningen utförs i GIS genom kartering av zonens utbredning mellan år 1965-2019 samt genom analys av förändring i ekotonens vegetation mellan år 1987-2019. Studien syftar även till att undersöka om förändringarna skiljer sig mellan Åreskutans sydsluttning och nordsluttning. Vidare genomförs en klimatanalys i syfte att undersöka om det finns ett samband mellan förändringar i ekotonen och lokala meteorologiska variationer.

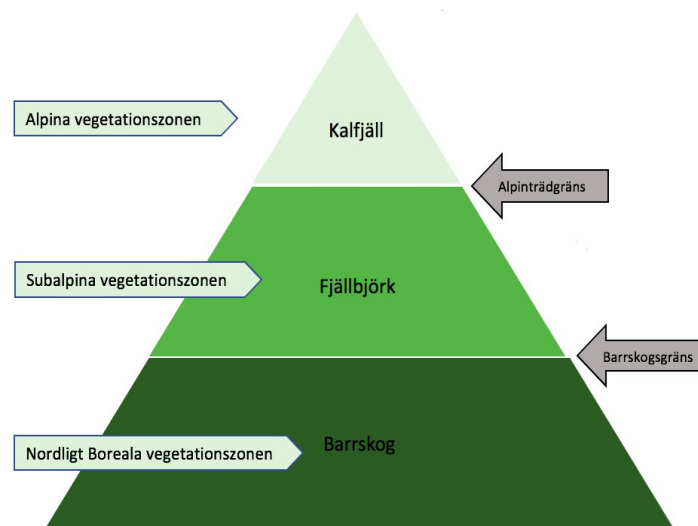
Frågeställningar:

- Hur har trädgränsen i skogs-tundra ekotonen förändrats på Åreskutan mellan åren 1965 och 2019?
- Förekommer det vegetationsförändringar inom skogs-tundra ekotonen på Åreskutan mellan åren 1987, 1995, 2002, 2007, 2015 och 2019?
- Hur skiljer sig skogs-tundra ekotonen mellan den södra sluttningen jämfört med den norra sluttningen?
- Vilka samband finns det mellan variationer i skogs-tundra ekotonen och lokala förändringar i årlig-, sommar- och vinterlufttemperatur, förändringar i årlig-, sommar- och vinternederbörd, förändringar i antal dagar med snötäckt markyta och förändringar i växtsäsongen under tidsperioden 1987-2019?

2. Kunskapsöversikt

2.1 Fjällområdets vegetationsindelning

De nordiska fjällområdena kan delas upp i vertikala vegetationszoner (Fig. 1). Fjället är här indelat i tre vegetationszoner. Den högst belägna zonen är den alpina vegetationszonen, även kallat kalfjället, som främst består av ängs- och hedmarker samt en glaciär högalpinzon. Terrängen nedanför kalfjället består främst av fjällbjörk och räknas traditionellt till den subalpina vegetationszonen. Denna ekoton gränsar sedan till fjällbarrskogen som tillhör den nordligt boreala vegetationszonen som i sig är en övergångszon mellan fjäll och produktiv skogsmark (Hedenås et al., 2016).



Figur 1. Fjällens indelning efter vertikala vegetationszoner

Figure 1. The division of the mountain regions by vertical vegetation zones

2.2 Subalpin vegetationszon

Aktuellt för studien är den subalpina vegetationszonen. Vegetationen utgörs främst av fjällbjörkskog (*Betula pubescens ssp. czerepanowii*) men i den nedre och mellersta delen återfinns ofta ett fåtal ensamma barrträd (Kullman & Öberg, 2015). Den sammanhängande fjällbjörkskogen bildar en övre trädgräns där kalfjället tar vid (Rafstedt, 1984), en gräns som inte bör förväxlas med den slutna barrskogens övre gräns som främst består av trädarterna gran (*Picea abies*) och tall (*Pinus sylvestris*) (Kullman & Öberg, 2015). Då ekotoner är unika för varje fjällsluttning och samtidigt har en diffus gräns (Kullberg & Öberg, 2015) kan det vara svårt att definiera var skogsgränsen går. Körner (2012) menar att dess position bör ses i relation till bergssidans termiska förhållanden snarare än att mätas i höjd. Fjällbjörken anses

ha som bäst tillväxt i maritima klimat med mycket snö (Öberg, 2008) och ekotonen mellan kalvfjäll och sammanhängande fjällbarrskog som ligger i de västra nederbördsrika fjälltrakterna kan därför bli upp till hundratals meter bred (Rafstedt, 1984; Öberg, 2008).

2.3 Alpin trädgräns

Den alpina trädgränsen definieras oftast som där den sista minst 2 meter höga trädarten återfinns (högsta nivå över havet) (Kullman & Öberg 2015; Hofgaard et al., 2013). Denna specifika definition innebär dock inte en konkret linjeformad gräns utan det handlar oftast om ensamstående träd uppe på kalvfjället, vanligtvis björk. Generellt är även denna gräns oftast belägen på högre höjder i de södra fjällområdena (ca. 950 m.ö.h) jämfört med de norra fjällområdena (ca. 600 m.ö.h) (Rafstedt, 1984). På Åreskutans södra sluttning återfanns trädgränsen år 1915 på 945 m.ö.h medan det år 2010 återfanns fjällbjörk på 1010 m.ö.h (Kullberg & Öberg, 2015). Att träden bara växer till en viss höjd beror enligt Rafstedt (1984) främst på att temperaturerna under sommaren tillslut blir för låga uppför fjället. Körner & Paulsen (2004) menar att ekotonens läge och sammansättning styrs av temperatur och att samtliga trädgränser i den subarktiska och boreala zonen därför är begränsade till höjder med genomsnittliga växtsäsongstemperaturer på 6–7 °C.

Studier har visat på att trädgränsens placering även kan skilja inom samma område då träden oftast växer högre på sydsluttningar jämfört med nordsluttningar (Kjällgren & Kullman, 2002; Treml & Banas, 2008). Detta blir särskilt tydligt i de branta sluttningarna som genom optimal instrålning uppnår maximala sommartemperaturer för tillväxt, men topografi och sluttningsslägets betydelse kan också resultera i en starkare tillväxt på andra sluttningar än nord- sydsluttningar (Van Bogaert et al., 2011).

Enligt Öberg (2008) har förändringar i trädgränsen under de senaste decennierna framförallt skett genom tillväxt av redan etablerade äldre träd. Trädgränsens läge kan antingen förändras genom nedbrytning alternativt tillväxt av befintliga träd eller etablering av nya träd. Fjällbjörk förökar sig lätt och har även en förmåga att återhämta sig snabbt vid skador vilket resulterar i att de sällan dör och Öberg (2008) menar även att fjällbjörken är mindre känslig för mekaniska störningar och att måttliga störningar till och med kan gynna tillväxt. För att fjällbjörken inte ska förlora sin vegetativa förmåga och för att ett kontinuerligt bestånd av fjällbjörk ska existera anses bland annat renbete, snöbrott och insektsutbrott vara viktiga störningsmoment (Öberg, 2008). En studie över trädgränsen i Abisko av Van Bogaert et al.

(2011) pekar samtidigt på att renbete i kombination med fjällbjörkmärlarv utgör det största hotet för fjällbjörskogens tillväxt.

2.4 Klimatets påverkan på ekotonen

Trädgränsen har historiskt nått både högre och lägre höjder än idag. Under den varma fasen av Holocen för omkring 9000-10000 år sedan då klimatet var både varmare och torrare antas björk, tall och gran ha växt omkring 400-600 meter högre upp på fjället jämfört med idag (Kullman & Öberg, 2009).

Medan tillväxten av träd vid höga höjder generellt antas vara starkt korrelerat med temperaturen (Harsch et al., 2009) är sambandet mellan förändringar i skogs-tundra ekotonen och klimatförändringarna väldigt diskuterat i litteraturen. Uppfattningen finns att klimatuppvärmningen kanske inte är den enda mekanismen som bidrar till den observerade vegetationsrörelsen. Träd och skogssystem kan enligt Van Bogaert et al. (2011) reagera olika på förändringar där uppvärmning kan öka tillväxten samtidigt som plantornas överlevnad kan minska på grund av vattenstress orsakad av större avdunstning och torka. Van Bogaert et al. (2011) menar även att förändringar i ekotonen kan styras helt av lokala störningar och att användningen av trädgränsen för att övervaka klimatförändringar därför bör göras med försiktighet. Den stora variationen i fjällområdenas topografi och lokala klimat komplicerar utan tvekan bilden (Harsch et al., 2009) och faktorerna som styr trädgränsens position och ekotonens struktur verkar variera beroende på studiens plats och omfattning. Medan en del studier ser den observerade framryckningen av trädgränsen som ett svar på uppvärmningen menar andra att förändringar snarare kan förklaras med faktorer som bland annat markanvändning, växttätare och plötsliga händelser som laviner, jordskred och bränder (Truong et al., 2007; Cudlín et al., 2017; Van Bogaert et al., 2011; Holtmeier, 2009). En studie i Abisko av Van Bogaert et al. (2011) visade att trädgränsens expanderingshastighet var som mest uttalad under en period med kallare temperaturer under 1960- och 1970-talen och fann att dessa framryckningar var signifikant korrelerade med perioder av små renpopulationer. Å andra sidan fann en studie av Cudlín et al. (2017) att den största delen av den observerade variationen i bergsvegetation nära trädgränsen i Europa verkade orsakas av bland annat geomorfologisk, geologisk och mikroklimatisk variation i kombination med markanvändning och socioekonomiska förhållanden. Vidare fann Cudlín et al. (2017) att skillnader i observerade klimatparametrar jämfört med referensperioden 1960-1990 inte kunde förklara de relativt höga skillnaderna i graden av trädgränsförändring per år.

2.4.1 Påverkan under vegetationsperioden

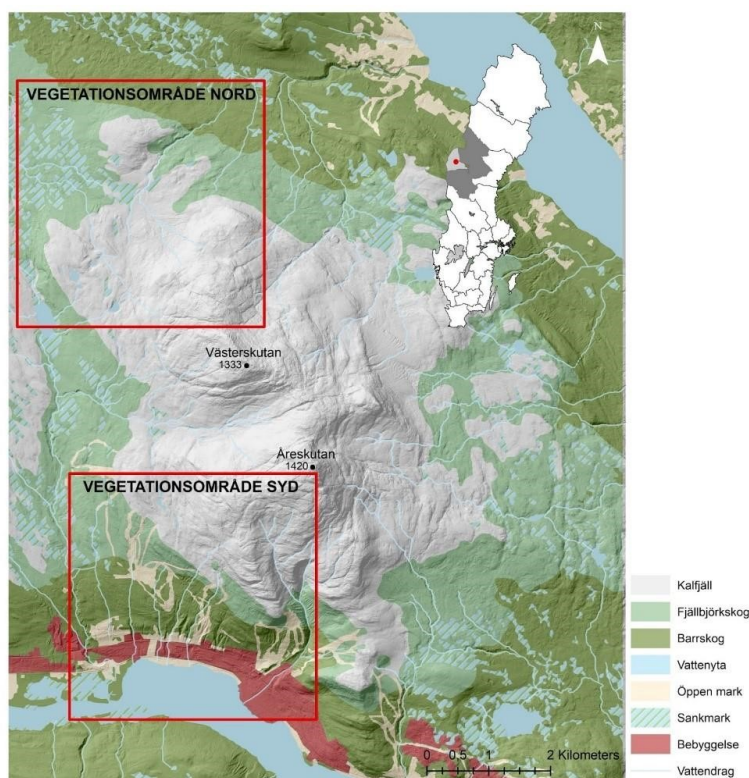
Globalt sett anses vegetationsperioden och sommarens temperatur vara utslagsgivande för trädgränsens läge (Körner, 2012) där kalla sommarförhållanden och kortare växtsäsonger därför kan tyda på att trädgränsens tillväxt försämras. Enligt Körner (2012) bör egentligen vegetationsperiodens start definieras med marktemperaturen, då marktemperaturen i trädens rotzon är ett säkrare abiotiskt mått på den verkliga aktiva växtsäsongen än lufttemperaturen. Marktemperaturer är dock sällan tillgängliga från meteorologiska institut vilket gör att den generella definitionen av vegetationsperiod som baserats på lufttemperatur oftast används. Enligt Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (2021a) är detta den del av året då dygnsmedeltemperaturen överstiger ett gränsvärde av 3-5 °C under 4 dagar i sträck. Gränsvärdet varierar beroende på växtslag, men gemensamt är att perioden startar en bit in på våren och slutar under hösten. Vegetationsperiodens längd är generellt kortare norrut och på högre höjder vilket gör att fjälltrakternas växtsäsong därför varierar från omkring 100 dagar i nord till omkring 130 dagar i syd. Detta är betydligt kortare jämfört med till exempel Skåne som har en vegetationsperiod på omkring sju månader (SMHI, 2021a).

2.4.2 Påverkan under vinterperioden

Flertalet studier tyder även på att förhållandena under vintermånaderna är en viktig faktor vid undersökning av variationer i trädgränsen. Ur ett globalt perspektiv är enligt Harsch et al. (2009) de trädgränser som upplever en starkare vinteruppvärmning mer benägna att avancera. På en lokal nivå ser Holtmeier (2009) dock inte vintertemperaturen som en styrande faktor utan ser vintern snarare som en period där faktorer som starka vindar, snö- och isskador samt uttorkning kan bidra till hämmad tillväxt för enskilda områden och träd. Snöförhållanden verkar å andra sidan även kunna vara en faktor som bidrar till tillväxt. I Uralbergen (Hadgehorn, 2014) och Skanderna visar ett antal observationer att trädgränsens tillväxt varit som störst under det senaste århundradet i områden som haft hög vinternederbörd och på vindskyddade sluttningar där snön kan ackumuleras och isolera växtvävnader och rötter (Kullman & Öberg, 2009; Aune et al., 2011). I Abisko har det under det senaste decenniet även observerats en korrelation mellan ökad busktillväxt och klimat med etablering av nya buskpopulationer på allt högre höjder. Förutom med varma somrar anses denna tillväxt även vara korrelerad med vinterns snötäcke (Hallinger et al. 2010).

3. Studieområde

Studieområdet utgörs av Åreskutan (1420 m.ö.h) som ligger i Åre kommun i västra Jämtland. Vid Åreskutans södra fot ligger Åre samhälle (ca 380-420 m.ö.h) och Åresjön. Området för kartering av skogs-tundra ekotonen är indelat i två mindre områden på 4x4 km vardera som vidare benämns “vegetationsområde syd” och “vegetationsområde nord” (Fig. 2). Vegetationsområde syd innefattar Åreskutans sydvästra sluttning och har en höjdskillnad från ca 370 m.ö.h till ca 1400 m.ö.h. Vegetationsområde nord innefattar Åreskutans nordvästra sluttning och har en höjdskillnad från ca 480 m.ö.h till ca 1200 m.ö.h. Vad som främst skiljer områdena åt är, förutom väderstreck, att vegetationsområde syd till stor del är präglad av mänsklig aktivitet i form av vägar, flertalet nedfarter och skidliftsanläggningar medan vegetationsområde nord är präglad av mer orörd natur och arealer med hög markfuktighet.



Figur 2. Åreskutan med vegetationsområde syd och nord. Data: ©Lantmäteriet

Figure 2. Åreskutan with vegetation area south and north. Data: © Lantmäteriet

Hädanefter syftar benämningen “studieområde” till hela området innehållande Åreskutan med omnejd medan “vegetationsområde syd” samt “vegetationsområde nord” syftar till de markerade områdena för kartering och vegetationsanalys.

3.1 Geologi

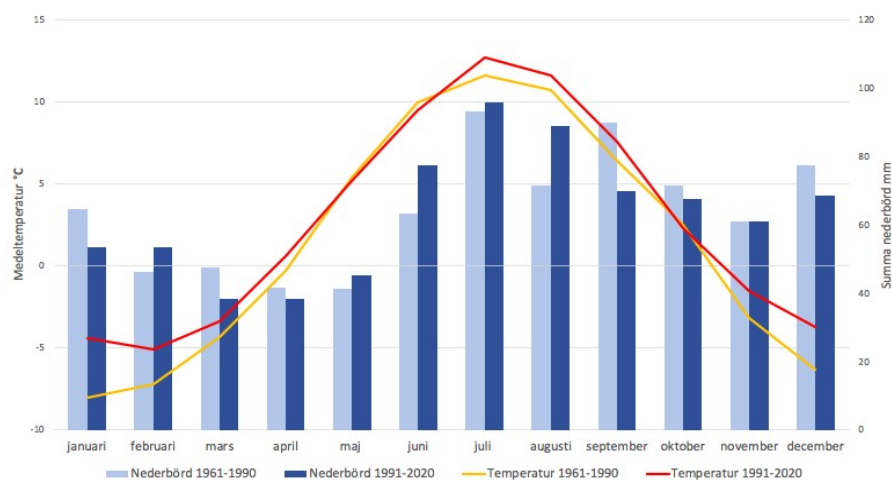
Åreskutan är lokaliserat i den sydvästra delen av den skandinaviska fjällkedjan. Vid bildningen av fjällkedjan sköts stora flak, så kallade skollor, av berggrund från väster mot öster ut över urberget och skapade markerande branter mot öst och flackare sluttningar mot väst (SGU, 2017). Åreskutan är en del av Seveskollkomplexet och är främst uppbyggd av amfibolit och glimmerskiffer (Bergman et al., 2012). Fjället avvattnas av ett antal vattendrag och på dess sydsluttning avrinner vattnet genom östra och västra ravin vidare till Mörviksån som genom åren tillfört det slamströmssediment som Åre samhälle vilar på idag (Cederbom et al., 2015). Åreskutans kalvfjäll är uppbyggt av hårda och kalkfattiga bergarter medan det omkringliggande landskapet vilar på lättvittrad och kalkrik berggrund (Rafstedt, 1984).

3.2 Vegetation

Vegetationsförhållanden i fjällområden skiljer sig från andra delar av landet och lokala förhållanden vad gäller topografi, geologi och klimat har stor påverkan. Generellt kan sägas att högre altituder medför lägre temperaturer, ökad nederbörd, förändrade markförhållanden och kortare växtsäsong (Rafstedt, 1984). Vegetationen i studieområdets lägre terräng består av barrskog som med höjden övergår till björkskog och vidare till kalvfjäll med ris- och gräshed samt alpin lågörtäng. Det omgivande landskapet är präglad av den lättvittrade och kalkrika berggrunden vilket bidrar till högre ängsandel och stor artrikedom (Rafstedt, 1984; Öberg, 2008).

3.3 Klimat

På grund av Jämtlands läge vid Norges smala midja med relativt lågt belägna berg är klimatet i länet starkt präglad av Atlanten i väst. Inflytandet från oceanen gör sig tydligast under vinterhalvåret där de västliga delarna upplever milda och nederbördsrika vintrar (SMHI, 2009). Åreskutan och Mullfjällets alpina topografi agerar som en barriär för det fuktiga atlantvädret (Rafstedt, 1984) och för normalperioden 1991-2020 uppgår Åres normalvärde för årsnederbörd till 790 mm och årsmedeltemperatur till 2,6 °C (SMHI, 2021b). En jämförelse av Åres normalvärden för normalperioden 1961-1990 och normalperioden 1991-2020 visar att medeltemperaturen för både sommar och vinter har ökat för perioden 1991-2020 medan nederbörden har ökat främst under sommarmånaderna (Fig. 3).



Figur 3. Normalvärden för temperatur och summa nederbörd från normalperioden 1961-1990 samt normalperioden 1991-2020 i Åre. Data: SMHI, 2021.

Figure 3. Normal values for temperature and total precipitation from the normal period 1961-1990 and the normal period 1991-2020 in Åre. Data: SMHI, 2021.

3.4 Markanvändning

Åredalen har gått från att vara ett mindre fjälljordbrukssamhälle till att idag vara en utbredd turistort där fjället erbjuder både vinter- och sommaraktiviteter med ett ökat besöksstryck över hela året. Orten har länge varit en kommunikationsbygd där människor med olika syften tagit sig fram genom landskapet men i och med invigningen av järnvägen i slutet av 1800-talet började fjällturismen växa fram för långväga turister. Med detta inleddes en landskapsförändring av Åredalen med tillkomsten av hotell, pensionat och restauranger som resultat. Inspiration från alperna skapade en vision om att göra området till en betydande vintersportort och år 1910 invigdes Åre bergbana som blev byns första transport till fjället. Åres första släplift anläggs 1939 och år 1976 invigdes Åre kabinbana vilken genom sin bana från dalen till toppen öppnade upp högzon för skidåkning (Loock, 2009).

Expanderingen av skidorten har inneburit en betydande markexploatering för de pister och liftanläggningar som idag sträcker ut sig i sidled och höjddled över fjället. Den branta terrängen med förhållandevis finkorniga jordar gör att området är präglad av slamströmmar (Cederbom et al., 2015), erosion och en ökad materialtransport (Länsstyrelsen Jämtlands län, 2017). Dessa naturliga processer har i och med exploateringen intensifierats vad gäller frekvens och omfattning vilket i sin tur bland annat leder till att Åresjön får ta emot stora mängder sediment (Länsstyrelsen Jämtlands län, 2017).

4. Data och metoder

Metoden bygger huvudsakligen på bearbetning och analys av fjärranalysdata i form av ortofoto och satellitbilder.

4.1 Data

4.1.1 Ortofoto

De äldsta tillgängliga ortofotona från 1965 och de nyaste tillgängliga ortofotona från 2019 har använts för identifiering och kartering av trädgränsen i ekotonen. Ortofoton består av bearbetad flygbildsdata som med hjälp av en höjdmodell är geometriskt projicerade till en skalenlig kartprojektion. Flygbilderna genomgår en georeferering och räknas därefter om från centralprojektion till ortogonalprojektion och justeras för variationer i skala som orsakas av höjdskillnader i terrängen. Bearbetningen av flygbildsdata innebär att faktorer som dis, solvinkel, markförhållanden, framkallningsresultat samt skanningsresultat alltid kan ha påverkan och ge viss variation i bilderna (Lantmäteriet, 2020). Ortofotona är hämtade från Lantmäteriets geodataportal samt SLU:s GET-tjänst och kommer i geografiskt referenssystem SWEREF99 TM. Ortofoto 1965 fanns tillgängligt i svartvitt medan ortofoto 2019 fanns tillgängligt i både färg (RGB) och infrarött (IR). Ortofoto 1965 har en upplösning på 0,5 m/pixel och ortofoto 2019 har en upplösning på 0,16 m/pixel (Tab. 1).

Tabell 1. Nedladdade ortofoton och dess metadata.

Table 1. Downloaded orthophotos and its metadata.

År	Film	Upplösning (m/pixel)	Flygdatum	Flyghöjd (m)	Höjdmodell	Medelfel (m)
1965	Svartvit	0,5	1965-08-18 kl 13:47:00+01:00 1965-08-16 kl 11:03:00+01:00	4600	GSD Höjddata grid 50+	2.0
2019	Färg (RGB) och IR (IRG)	0,16	2019-07-10 kl 16:39:44+02:00	3000	NH 5m grid editerad	0.2

4.1.2 Nationella marktäckedata (NMD)

Nationella marktäckedata (NMD) har använts som stöd och referens för att urskilja olika vegetationszoner i tolkningsprocessen vid karteringen. NMD består av en rikstäckande kartering av Sveriges marktäcke och är framtagen av Naturvårdsverket i samverkan med bland annat MSB, SCB och Rymdstyrelsen i syfte att få grundläggande information om landskapet och dess förändringar. Karteringen genomfördes under 2017-2019 och bygger på satellitdata, laserdata samt redan befintliga kartor (Naturvårdsverket, 2020a). Marktäckedatan består av en baskartering i 25 tematiska klasser med markanvändning och i denna studie tillämpas basskitet skogsmark och tilläggskitet låg fjällskog som är hämtade från Naturvårdsverkets nedladdningstjänst. Samtliga är i Tif-format med 10 meters upplösning och i geografiskt referenssystem SWEREF99 TM.

4.1.2.1 Skogsmark

Skogsmark i NMDs basskit är i enlighet med definitionerna i skogsvårdslagen och FNs livsmedels- och jordbruksorganisation (FAO) som definierar skog som trädklädda områden med trädhöjd på över 5 meter och över 10 % krontäckning (Naturvårdsverket, 2020a).

4.1.2.2 Låg fjällskog

Låg fjällskog definieras som trädklädda områden inom fjällnära gräns, med en trädhöjd på mellan 2-5 meter och en krontäckning på minst 10 %. Metoden bygger på laserdata vilket innebär att skiktet även kan innehålla både fjällbjörk- och fjällbarrskog samt buskar som är 25 meter höga med 10 % krontäckning (Naturvårdsverket, 2020b). Vid granskning av skiktet upptäcktes även att större stenar och andra uppstickande höjder på mellan 2-5 meter ibland klassades som fjällbjörk inom studieområdet.

4.1.3 Satellitdata

Satellitbilder från åren 1987-2019 har använts för att skapa Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) i syfte att undersöka och analysera förändring i vegetation. Studien strävar efter insamlad data från samma period på året samt en längre tidsserie. Detta innebär att åren utvalda för studien har baserats på tillgänglig data med dessa kriterier. Samtlig satellitdata är hämtad i Earth Explorers nedladdningsportal och kommer i geografiskt referenssystem WGS 84 (Tab. 2). Satellitbilderna hämtades i level-2, vilket innebär att bilderna är atmosfäriskt korrigerade.

4.1.3.2 Landsat 1-8

Det är fördelaktigt att vid förändringsanalys använda data från samma sensor och då Landsat, som ingår i NASA:s program har bilder från 1970-talet och framåt, användes dessa satelliter för att undersöka vegetationsförändringarna. Landsat-1 var den första satelliten som lanserades 1972 med syftet att samla in bilder i fyra spektrala band för att studera och övervaka markförändringar på jorden. Med tiden har det tillkommit nyare versioner och idag är det Landsat-8 som bevakar markförändringar genom att generera högupplöst multispektral data (USGS, u.å.). Landsatsatelliterna har olika antal band som befinner sig i det nära infraröda spektrat och det röda spektrat som används vid NDVI. Bilder från Landsat-5 kommer i sju band och för studien används band 4 (*Near-Infrared: 0.76 - 0.90 μm*) och band 3 (*Visible red: 0.63 - 0.69 μm*). Den nyare satelliten Landsat-8 kommer i nio band där band 5 (*Near-Infrared: 0.85 - 0.88 μm*) och band 4 (*Visible red: 0.64 - 0.67 μm*) använts i denna studie (Tab. 2).

Tabell 2. Nedladdad satellitdata och dess metadata. Data: Earth Explorer, 2021.

Table 2. Downloaded satellite data and its metadata. Data: Earth Explorer, 2021.

Satellit	Datum	Upplösning (m/pixel)	Band	Visible Red spektra (μm)	Near-Infrared spektra (μm)	Bits
Landsat-5	1987-07-21 kl 09:55	30	7	Band 3 (0.63 - 0.69)	Band 4 (0.76 - 0.90)	16
Landsat-5	1995-07-11 kl 09:35	30	7	Band 3 (0.63 - 0.69)	Band 4 (0.76 - 0.90)	16
Landsat-5	2002-08-07 kl 10:18	30	7	Band 3 (0.63 - 0.69)	Band 4 (0.76 - 0.90)	16
Landsat-5	2007-08-06 kl 10:17	30	7	Band 3 (0.63 - 0.69)	Band 4 (0.76 - 0.90)	16
Landsat-8	2015-07-02 kl 10:29	30	9	Band 4 (0.64 - 0.67)	Band 5 (0.85 - 0.88)	16
Landsat-8	2019-07-29 kl 10:30	30	9	Band 4 (0.64 - 0.67)	Band 5 (0.85 - 0.88)	16

4.1.4 Klimatdata

Dataserier över lufttemperatur månad/dygn, nederbörd, snödjup och markytans tillstånd har använts för att undersöka sambandet mellan variationer i ekotonen och lokala meteorologiska faktorer. Datan är hämtad från SMHI:s tjänst för nedladdning av meteorologiska observationer och kommer från SMHI:s egna mätstationer i Storlien-Visjövalen, Storlien-Storvallen och Storlien-Storvallen A (Tab. 3). Samtliga av dessa stationer ligger cirka 50 km väster om studieområdet. Avståndet är beräknat i den kortaste vägen, oavsett topografiska hinder. Valet av stationerna i Storlien motiveras med att de är de stationer med längst tillgängliga dataserier och de är dessutom belägna på en höjd som är mer representativ för klimatet i studieområdet än mer närliggande stationer. Vid jämförelse av historiska tidsserier från en nedlagd väderstation på Åreskutan och den aktiva stationen Storlien-Storvallen bedöms även de generella klimattrenderna över tid stämma överens. Då stationerna har olika drifttider mellan 1964 och 2020 inhämtas data från olika stationer för att undvika luckor i dataserien.

Tabell 3. *Inhämtad klimatdata från SMHI i form av lufttemperatur, nederbörd och snötäcke, samt information om vilka tidsserier som hämtats från vilken väderstation och stationens höjdmeter.*

Table 3. *Collected climate data from SMHI, data of air temperature, precipitation and snow cover as well as information on which time series that have been retrieved from which weather station and the station's altimeter.*

Klimatdata	Typ av värde	Tidsserie	Väderstation	m.ö.h
Lufttemperatur	Medelvärde / månad	1963.10.01-2010.09.30	Storlien-Visjövalen Stationsnr: 132180	642
Lufttemperatur	Medelvärde / månad	2010.10.01- 2020.12.31	Storlien-Storvallen A Stationsnr: 132170	583
Lufttemperatur	Medelvärde / dygn	1963.10.01-2010.09.30	Storlien-Visjövalen Stationsnr: 132180	642
Lufttemperatur	Medelvärde / dygn	2010.10.01- 2020.12.31	Storlien-Storvallen A Stationsnr: 132170	583
Nederbörd	Summa 1 dygn	1963.10.01-2020.12.31	Storlien-Storvallen Stationsnr: 132180	583
Snödjup och markytans tillstånd	Dygn	1963.10.01-2020.12.31	Storlien-Storvallen Stationsnr: 132180	583

4.2 Metoder

4.2.1 Förändring i trädgränsen

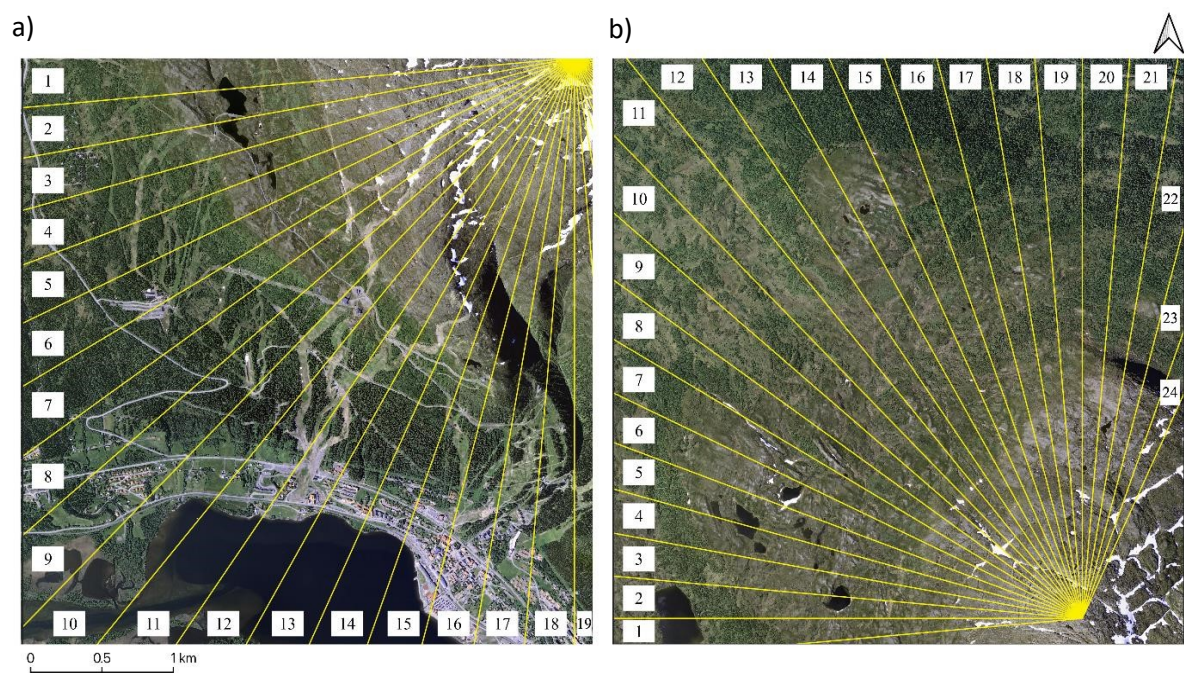
För att besvara frågeställning *“Hur har trädgränsen i skogs-tundra ekotonen förändrats på Åreskutan mellan åren 1965 och 2019?”* genomfördes en manuell kartering av Åreskutans trädgräns genom tolkning av ortofoton från år 1965 och 2019. Resultatet från karteringen av de båda åren analyserades sedan i syfte att studera ekotonens variation. Val av tolkning av ortofoton som metod motiveras med behovet av högupplöst data vid kartering av enskilda träd i kombination med behovet av historisk data.

4.2.1.1 Bearbetning av ortofoton

Vid förändringsanalys av ortofoton bör temporal, spatial, radiometrisk och spektral upplösning ha samma värden. Detta för att faktorer som skuggor och växtlighet ska te sig så lika som möjligt mellan de olika åren samt för att varje pixel ska innehålla samma mängd information (Bengtsson, 2007). Ortofotona i denna studie är baserade på flygbilder tagna under juli och augusti mellan kl.11.00-16.00. Varierad tid på dygnet innebär att skuggstrukturer skiljer sig något mellan åren, vilket det tagits hänsyn till vid karteringsprocessen. Då ortofoto 1965 har en spatial upplösning på 0,5 m/pixel genomgick ortofoto 2019 en omsampling från 0,16 m/pixel till 0,5 m/pixel. Och då ortofoto 1965 har en radiometrisk upplösning på 8 bitar genomgick ortofoto 2019 en komprimering från 32 bitar till 8 bitar. Skillnad i den spektrala upplösningen blir oundviklig i denna studie då ortofoto 1965 endast finns i ett band.

4.2.1.2 Kartering av ortofoto

Vegetationsområde syd och vegetationsområde nord karterades separat för åren 1965 och 2019. För att underlätta en jämförelse mellan data var det första steget att dela in respektive område i zoner. Detta gjordes genom att en cirkel placerades i respektive område med mittpunkt i områdets högsta punkt. Denna cirkel delades sedan in i sektioner på 5° vilket resulterade i att vegetationsområde syd delades in i 19 zoner och att vegetationsområde nord delades in i 24 zoner (Fig. 4).



Figur 4. Zonindelningen för **a)** vegetationsområde syd och **b)** vegetationsområde nord. Data ©Lantmäteriet
Figure 4. The zoning for **a)** vegetation area south and **b)** vegetation area north. Data: ©Lantmäteriet

Det andra steget var sedan identifiering av gränsen mellan fjällbjörk och kalvfjäll. Detta innebar en tolkningsprocess där den ljusare björkskogen först identifierades mot den mörkare barrskogen och där trädgränsens övre del sedan identifierades med hjälp av skuggor och färgskiftningar i terrängen. Ortofoto 2019 karterades först då möjligheten att använda infraröda bilder, NDVI och marktäckedata gav ett stöd i tolkningsprocessen som sedan underlättade det vidare arbetet med de svartvita äldre bilderna från 1965. De högst identifierade träden inom varje zon markerades med punkter som lagrades i separata shapefiler.

Det avslutande steget var sedan att med hjälp av Point Sampling Tool i QGIS extrahera höjddata för varje punkt som sedan analyserades för att undersöka höjdsiftningarna av de högst identifierade träden mellan de båda åren och för att identifiera i vilka delar av områdena det skett en förändring.

4.2.2 Vegetationsförändring

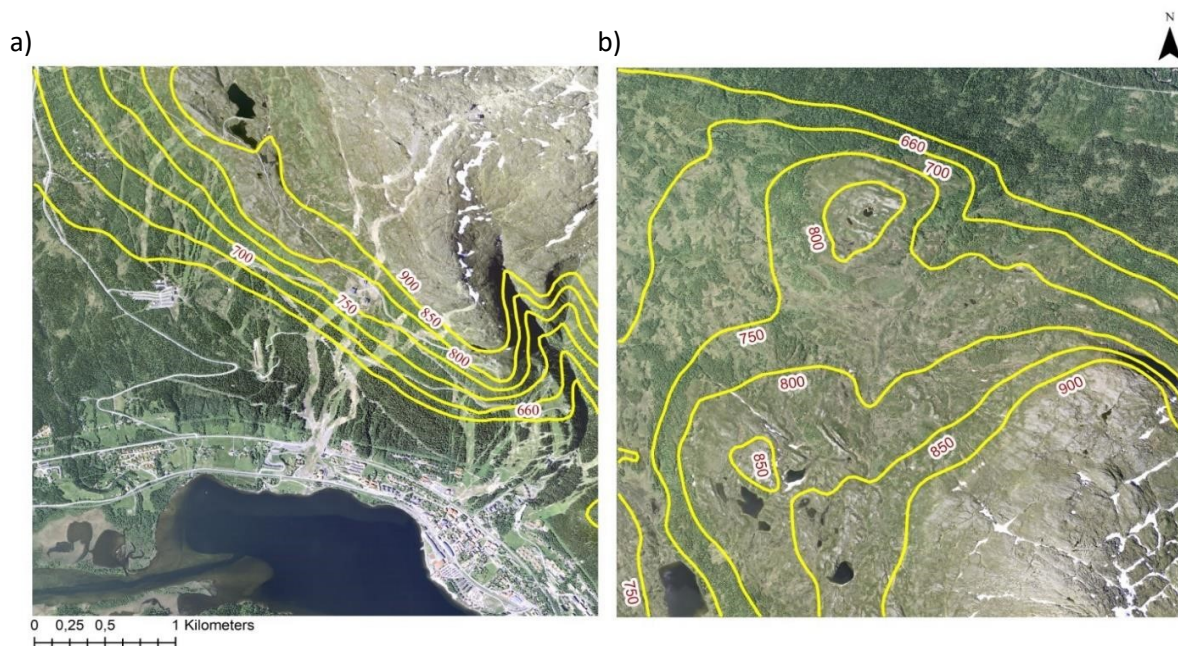
För att besvara frågeställning “Förekommer det vegetationsförändringar inom skogs-tundra ekotonen på Åreskutan mellan åren 1987, 1995, 2002, 2007, 2015 och 2019?” genomfördes en satellitbildsbaserad vegetationsanalys genom NDVI.

4.2.2.1 Bearbetning av satellitdata

Datan från Landsat-5 och Landsat-8 kommer i samma upplösning och behövde därför varken komprimeras eller omsamplas innan analys. Den bearbetning som gjordes var att satellitbildens rasterlager klipptes i QGIS efter utbredningen i vegetationsområde syd samt vegetationsområde nord.

4.2.2.2 Förändringsanalys

För att undersöka förändringar inom ekotonen identifierades först området mellan den slutna barrskogen och kalfjället utifrån marktäckedatans basskikt *skogsmark* och tilläggsikt *låg fjällskog*. Därefter identifierades den höjdkurva som skar genom den slutna barrskogens översta gräns samt den höjdkurva som skar genom kalfjällets början. Detta resulterade i ett område som sträcker sig mellan 660 m.ö.h och 900 m.ö.h och är det område som används vid analys av förändringar i ekotonen. Vegetationsområde nord har en flackare terräng än syd vilket innebär att områdena fick olika area; ca. 3,82 km² i vegetationsområde syd och ca. 10,78 km² i vegetationsområde nord (Fig. 5).



Figur 5. Ekotonens utbredning (660-900 m.ö.h) för a) vegetationsområde syd och b) vegetationsområde nord.

Data: ©Lantmäteriet

Figure 5. The elevation range 660-900 m.a.s.l for a) vegetation area south and b) vegetation area north.

Data: ©Lantmäteriet

Vid analysen av vegetationsförändringar användes sedan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) som indikerar vegetationens fotosyntetiska aktivitet och hälsotillstånd genom analys av olika spektrala band i satellitbilder. Analysen görs utifrån det nära infraröda bandet

(NIR) som ligger i kronplåtåernas högre reflekterande spektra och det röda bandet (Red) som ligger i ett starkt klorofyll absorptionsspektrum (Earth Observing Systems, u.å.). Med hjälp av rasterkalkylatorn i QGIS beräknades ett NDVI-index för varje årtal (1987-2019) utifrån banden NIR och Red från Landsat-8 och Landsat-5 med ekvationen:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

Indexet genererar värden som sträcker sig från -1 till +1. Negativa värden antyder molnighet eller vatten. Mycket små värden (0.1 eller mindre) antyder stenar, sand eller snö. Måttliga värden (0.2 till 0.3) antyder buskar och ängar medan höga värden (0.6 till 0.8) antyder hög fotosyntes som motsvarar tempererade och tropiska skogar (Earth Observing Systems, u.å.).

NDVI-värdena som producerats av ekvationen klassificerades sedan med hjälp av verktyget *Omklassificera med tabell* vars algoritm omklassificerar ett raster genom att tilldela utvalda värden. De ursprungliga och de omklassade värdena visas i tabell 4 nedan. Eftersom värden som antyder på buskage och ängar är mellan 0.2-0.3 användes värdena 0.3-0.6 som definitionen för vegeterad yta i denna studie då dessa värden bäst representerar björkskogen.

Tabell 4. Omklassade rastervärden för NDVI.

Table 4. Reclassified values of the NDVI rasters.

NDVI-värde	-1 - 0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6
Omklassat värde	-1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

För att få ut statistik över hur många pixlar varje NDVI har i varje klass användes *Rapport* med rasterlagrets unika värden vars algoritm ger en rapport på antalet pixlar och totala area av varje unikt värde i ett raster. Data från rapporten analyserades för att undersöka skillnader i fotosyntes mellan åren. Därefter extraherades även höjddata för varje pixel och sorterades in i 50-meters höj dintervall vilket resulterade i följande fem klasser: 660-700 m.ö.h, 700-750 m.ö.h, 750-800 m.ö.h, 800-850 m.ö.h och 850-900 m.ö.h. Data från höj dintervallerna analyserades sedan för att undersöka höjdmässiga skillnader i fotosyntes mellan åren.

4.2.3 Klimatanalys

För att besvara frågeställning “*Vilka samband finns det mellan variationer i skogs-tundra ekotonen och lokala förändringar i lufttemperatur, nederbörd, snötäckets varaktighet och vind under tidsperioden 1987-2019?*” genomfördes en klimatanalys som bestod av en bearbetning och beräkning av studieområdets klimatdata från 1964 till 2020 baserat på det hydrologiska året som löper från 1 oktober till 30 september efterkommande år. Samtliga klimatfaktorer redovisas i punktdiagram med ett glidande medelvärde på sju år vilket är ett medelvärde av perioden mellan de undersökta åren. Detta efterföljdes av en sambandsanalys mellan förändringen i ekotonen och de olika klimatfaktorerna.

4.2.3.1 Lufttemperatur

Då temperaturen generellt sjunker cirka 0,6 °C per 100 höjdmeter (SMHI, 2021c) justeras lufttemperaturen efter höjdskillnaden för att motsvara studieområdets klimat. Studieområdets referenshöjd fastställdes till 800 m.ö.h, vilket innebar att Storlien-Visjövalen (642 m.ö.h) och Storlien-Storvallen A (583 m.ö.h) behövde justeras olika. Datan bearbetades och nya korrigerade dataserier skapades där sommartemperaturerna sänkts med 0,9 grader för Storvallen baserat på en höjdskillnad av 158 meter och 1,3 grader för Visjövallen baserat på höjdskillnad på 217 meter. Därefter beräknades årsmedeltemperaturen genom att ta fram medelvärden från månadstemperatur mellan 1964-2020, somarmedeltemperaturen genom att ta fram medelvärden från månadstemperatur juni till augusti 1964-2020 och vintermedeltemperatur genom att ta fram medelvärden från månadstemperatur december till februari 1964-2020.

4.2.3.2 Nederbörd

Den orografiska effekten innebär en ökad nederbörd ju högre upp i terrängen man kommer och denna varierar över tid då lokala väderförhållanden som vindriktning, luftfuktighet och temperatur påverkar (Cederbom et al., 2015). Cederbom et al. (2015) anger att SMHI:s generella riktvärde för den orografiska effekten är 10 % ökning av nederbörden per 100 höjdmeter. Detta innebär att även summan av nederbörd justerades efter höjdskillnaden på 217 meter från Storlien-Storvallen A (583 m.ö.h) för att motsvara klimatet i studieområdet. Datan bearbetades och nya korrigerade dataserier för nederbörd skapades. Därefter beräknades årsvärden för summa nederbörd efter dygnsmätningar 1964-2020, värden för summa nederbörd efter dygnsmätningar under sommarmånaderna juni till augusti 1964-2020

och värden för summa nederbörd efter dygnsmätningar under vintermånaderna december till februari 1964-2020.

4.2.3.3 Snötäcke

Antal dagar med snötäcke per år beräknades från dygnsmätningar av snödjup och dagliga rapporter om markytans tillstånd. Snötäcke räknas här i enlighet med SMHI:s marktillståndsvärden 0-19 (SMHI, u.å.). Värdekoderna 13-19 är utvalda för denna studie, då dessa innebär ett marktillstånd från *Delvis eller helt täckt av packad eller våt snö – helt och i ett jämnt lager* till ett marktillstånd *helt täckt av snö med höga drivor* (SMHI, u.å.).

4.2.3.4 Växtsäsong

Växtsäsongens startdatum och antal dagar under perioden 1964-2020 beräknades från inhämtade värden på dygnsmedeltemperaturer. Växtsäsongens start valdes till första perioden på året med minst fem sammanhängande dagar där temperaturen överstiger 5°C och växtsäsongens slutdatum beräknades till sista dag på året med minst fem sammanhängande dagar där temperaturen överstiger 5°C. Temperaturgränsen är baserat på SMHI:s definition av vegetationsperioder (SMHI, 2021b).

4.2.4 Sambandsanalys

För att undersöka sambandet mellan variationer i skogs-tundra ekotonen och klimatfaktorer samt testa signifikansen av dessa genomgick resultatet från vegetationsanalysen och klimatfaktorer (förändring i årlig-, sommar- och vinterlufttemperatur, årlig-, sommar- och vinternederbörd, antal dagar snötäckt markyta och växtsäsong) en linjär regressionsanalys. Den beroende variabeln *förändring i vegetation* analyserades med de olika oberoende variablerna *klimatfaktorer*. Då vegetationsförändringar kan ha en släpande påverkan från klimatförändringar tillbaka i tiden (Wu et al., 2015) gjordes även en regressionsanalys med klimatstatistik från föregående år och två år tillbaka.

4.3 Metoddiskussion

I ett försök att identifiera den av Öberg & Kullman (2015) observerade fjällbjörken på 1010 m.ö.h på Åreskutans södra sluttning användes det mest högupplösta ortofotot (0,16 m/pixel) från 2019. Trots att positionen för trädet var känd kunde det inte identifieras vilket indikerar svårigheten med att genom tolkning av ortofoton urskilja ensamma träd med en begränsad krontäckning. Detta betyder att de träd som är karterade i denna studie med stor sannolikhet inte representerar den faktiska trädgränsen med det högst placerade trädet på minst 2 meter. Därför har studien valt att benämna de karterade träden som "de högst identifierade träden". De historiska ortofotona är dessutom begränsade i sin information och bilderna innehåller variationer i geometri och skuggvinkel. Detta gör att bilden är svårtolkad och det bör noteras att karteringen av högst identifierade träd var en subjektiv process. Ett stort område i västra ravin var även täckt med skugga och identifiering av enskilda träd kunde därför inte göras inom detta område. Det faktum att det rör sig om historiska bilder i kombination med denna uppsats tidsmässiga begränsning har dessutom inneburit att möjlighet för fältresa och kontrollering av karteringen inte kunnat utföras.

Inför karteringen delades vegetationsområdena in i zoner baserade på områdets högsta punkt. Då vegetationsområdena har sina högsta punkter på olika platser inom området resulterade detta i olika antal zoner. Trots detta bedömdes det som den mest representativa indelningen. Inför vegetationsanalysen av ekotonen delades områdena in efter höjdiintervall och då vegetationsområde nord har en flackare terräng resulterade detta i att områdena fick olika area. Även detta bedömdes som det mest representativa sätt att dela in ekotonen i både syd och nord men vid direkt jämförelse mellan de båda områdena bör detta tas i beaktning.

Generellt visar NDVI-kartorna lägre värden än de förväntade normalvärdena för björkskog men det undersökta området bör snarare ses som en övergångszon än en enhetlig skog. Det bör även tas i beaktning att upplösningen på 30x30 meter innebär en generalisering av markytan vilket i praktiken kan innebära att ett ensamt eller ett fåtal björkträd inte fyller upp hela cellen utan omges av barmark eller buskage vilket påverkar värdet i varje enskild cell.

Den bakomliggande orsaken till att tidsperioden för att undersöka trädgränsen (1965-2019) skiljer sig åt från tidsperioden för att undersöka vegetationsförändringar (1987-2019) är att studien syftade till att undersöka så långt tillbaka i tiden som möjligt. Ortofoton fanns endast tillgängliga för året 1965 eller 1994 medan de första satellitbilderna från 1972 var obrukbara

och 1987 var därför första året med en användbar satellitbild över Åreskutan. Till vegetationsanalysen eftersträvades även insamlade satellitbilder med ett jämnt års- och tidsintervall men detta försvårades av att vissa år präglades av hög molnighet, sneda pixlar eller icke överlappande ”paths/rows”. Trots att data insamlats från ungefär samma tid på dagen resulterade dessa övriga svårigheter tillslut i sex utvalda år med ett ojämnt årsintervall. Detta är inte helt optimalt för denna typ av studie och de få åren kan även ha haft en påverkan på resultatet i regressionsanalysen. Datumen för satellitbilderna sträcker sig från det tidigaste datumet 2 juli till det senaste 7 augusti, vilket kan påverka resultatet då perioden med högst fotosyntes kan variera stort både inom ett år och från år till år. Skillnaden mellan den spektrala bredden av banden i Landsat-5 (*Near-Infrared*: 0.76 - 0.90 μm och *Visible red*: 0.63 - 0.69) och Landsat-8 (*Near-Infrared*: 0.85 - 0.88 μm och *Visible red*: 0.64 - 0.67 μm) kan även den ha en påverkan på resultatet, men detta är inte något som kan justeras. Det finns dessutom nästan alltid någon form av störning i data för NDVI-tidsserier som är orsakad av atmosfäriska variationer, moln eller dubbelriktade effekter (Chen et al., 2004). För att få så lite avvikelser som möjligt skulle till exempel metoden att använda sig av filter utvecklat för att bäst passa NDVI-variationerna under hela vegetationssäsongen vara något som skulle kunna implementeras vid en framtida NDVI-studie (Chen et al., 2004).

En annan metod som skulle kunna vara intressant för framtida studier över skogs-tundra ekotonen är en texturbaserad klassificering av satellitbilder. Då ekotonen mellan skog och tundra skapar unika texturer anser Guo et al (2020) att denna algoritm är optimal för att avgöra ekotonens avgränsning. Förutom satellitbaserade Vegetation Continuous Fields (VCF) bilder som beräknar trädtäckningen inom en pixel, är metoden baserad på referensdatapunkter som upplyser om studieområdets särdrag. Jämfört med andra pixelbaserade metoder anses denna metod vara robust även vid småskaliga variationer och därför kunna ge en relativt naturlig representation av en ekoton samtidigt som gränssnittet bevaras (Guo et al., 2020).

Förutom de avgörande faktorerna som klimat och topografi finns flertalet andra faktorer som lokalt påverkar skogs-tundra ekotonens utbredning och dynamik som till exempel björkmätarlarven och renbete som är vanliga faktorer i Sverige. Inga kända utbrott av björkmätarlarv har dock dokumenterats på Åreskutan under studieperioden och dessvärre kunde ingen rennäringssstatistik för specifikt Åreskutan tillhandahållas. Men för vidare studier skulle detta kunna undersökas ytterligare.

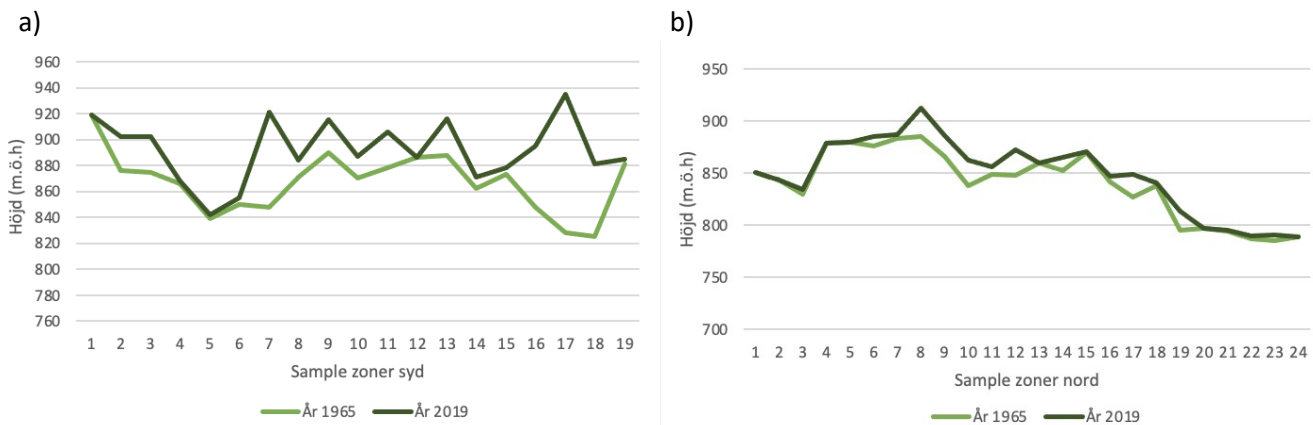
5. Resultat

5.1 Förändring i trädgränsen

Båda Åreskutans sluttningar visar på en generellt högre liggande trädgräns år 2019 jämfört med 1965. Inom vegetationsområde syd återfinns alla högst identifierade träd på högre höjder år 2019 jämfört med år 1965 förutom två där höjdskillnaden är oförändrad (Fig. 6a).

Medelhöjden för de högst identifierade träden år 1965 var 867 m.ö.h och år 2019 låg den på 892 m.ö.h vilket resulterar i en medelförändring på 25 meter. Den största ökningen kan observeras i zon 17, vid östra ravin, där förändringen uppgick till +107 meter.

Jämfört med vegetationsområde syd återfinns de högst identifierade träden i vegetationsområde nord på en lägre nivå samtidigt som medelförändringen är mindre. Där återfinns de högst identifierade träden på en högre höjd i 17 zoner år 2019 jämfört med år 1965 och står oförändrad i 7 zoner (Fig. 6b). Medelhöjden för de högst identifierade träden år 1965 var 840 m.ö.h och år 2019 låg den på 848 m.ö.h vilket resulterar i en medelförändring på 8 meter. Den största ökningen kan observeras i zon 8, i den västra delen, där förändringen uppgick till +27 meter.



Figur 6. Höjd (m.ö.h) på de högst identifierade träden inom respektive sample zon i a) vegetationsområde syd och b) vegetationsområde nord. Höjddata: ©Lantmäteriet

Figure 6. Height (m.a.s.l) of the highest identified trees within each sample zone in a) vegetation area south and b) vegetation area north. Elevation data: ©Lantmäteriet

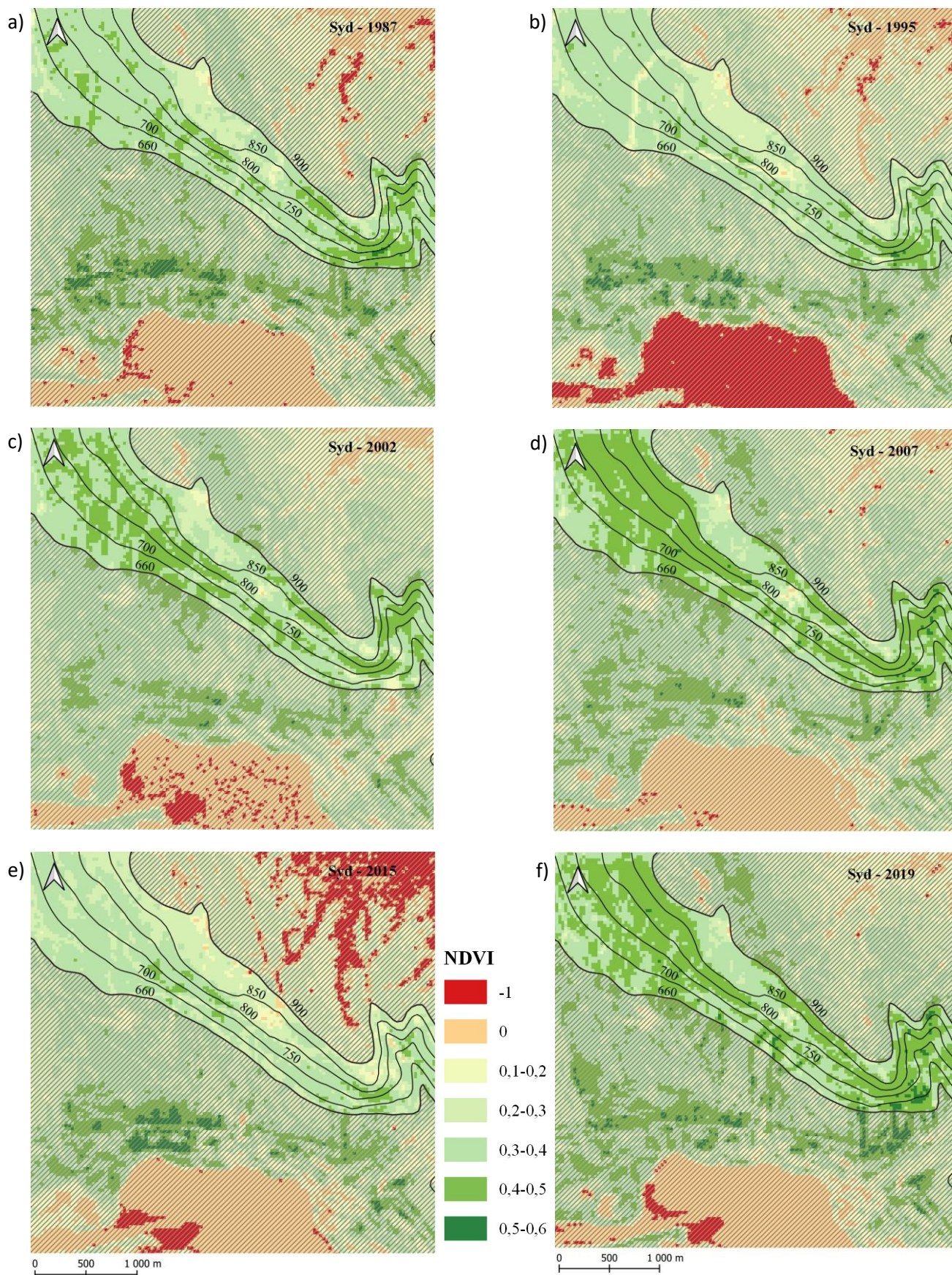
5.2 Vegetationsförändring

Inom vegetationsområde syd observeras en ökad produktivitet generellt inom hela ekotonen och andelen vegeterad yta för hela perioden har ökat från 3,21 km² (1987) till 3,63 km² (2019) (Tab. 5). Det går även att observera en ökning av fotosyntes där majoriteten av ytan år 1987 (Fig. 7a) hade NDVI-värden mellan 0.3-0.4 till att majoriteten 2019 (Fig. 7f) hade NDVI-värden mellan 0.4-0.5. År 2002 (Fig. 7c) går det att observera en ökning av fotosyntes i områdets västra del som fortgår fram till år 2019 (Fig. 7f) med undantag för år 2015 (Fig. 7e) som påvisar lägre värden. 1995 och 2015 har lägst värden där 2015 sticker ut ytterligare med endast 59 % yta inom klassningen för vegetation. Endast några få procent av ekotonens totala area för samtliga år påvisar NDVI-värden mellan 0.5-0.6.

Tabell 5. Andelen (%) av totalytan som befinner sig inom respektive NDVI-klass samt värden för vegeterad yta i vegetationsområde syd.

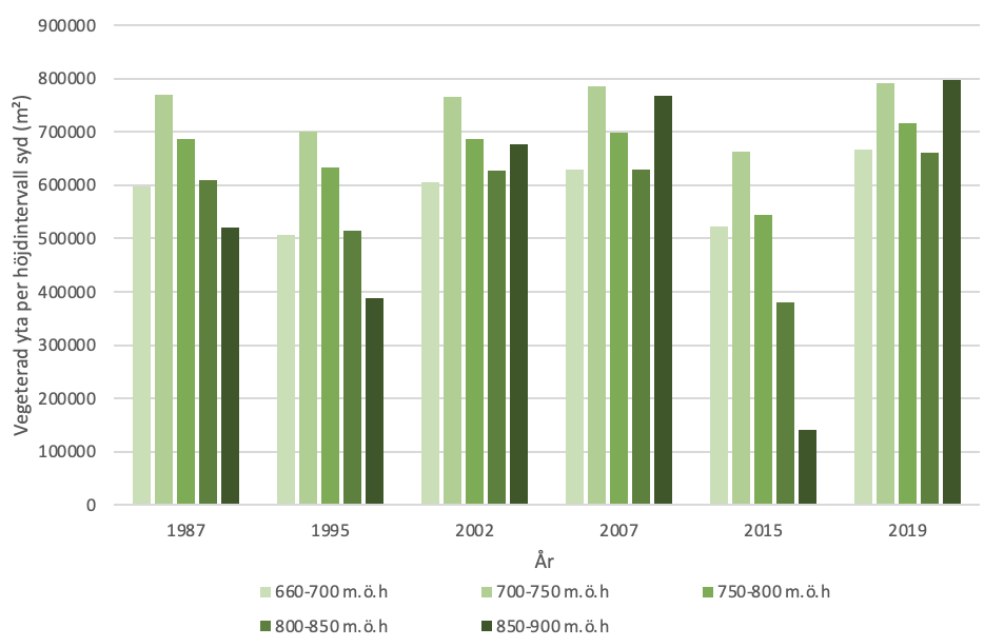
Table 5. The proportion (%) of the total area that falls within each NDVI class as well as values for vegetated area in vegetation area south.

År	NDVI -1 (%)	NDVI 0 (%)	NDVI 0.1-0.2 (%)	NDVI 0.2-0.3 (%)	NDVI 0.3-0.4 (%)	NDVI 0.4-0.5 (%)	NDVI 0.5-0.6 (%)	Vegeterad yta NDVI 0.3-0.6 (%)	Vegeterad yta NDVI 0.3-0.6 (m ²) (km ²)	
1987	0,00	0,12	1,10	14,20	63,94	20,30	0,33	84,58	3208063	3,21
1995	0,00	0,24	3,29	23,19	63,40	9,73	0,14	73,28	2779403	2,78
2002	0,00	0,05	1,67	9,04	53,61	35,63	0,00	89,24	3384928	3,38
2007	0,02	0,12	0,86	5,79	37,11	55,38	0,74	93,23	3536398	3,54
2015	0,02	0,81	3,91	35,92	54,76	4,58	0,00	59,34	2250650	2,25
2019	0,00	0,05	0,38	3,87	40,76	53,05	1,90	95,71	3630197	3,63



Figur 7.a-f. NDVI index för 1987-2019 i Vegetationsområde syd. Data: Earth Explorer
Figure 7.a-f. NDVI index for 1987-2019 in Vegetation area south. Data: Earth Explorer

Fördelningen av vegeterad yta mellan 660 m.ö.h och 900 m.ö.h i vegetationsområde syd visar en ökning av vegeterad yta mot högre höjder (Fig. 8). Inom det högsta höjdintervallet 850-900 m.ö.h var det 521100 m² av vegeterad yta år 1987 och 796500 m² år 2019, vilket motsvarar en ökning på 53 %. Inom detta höjdintervall har värdena för resterande år ökat med tiden med undantag för 2015 som påvisar lägre värden jämfört med samtliga år. Figur ändrad



Figur 8. Vegeterad yta (m²) per höjdintervall i vegetationsområde syd. Höjddata: ©Lantmäteriet

Figure 8. Vegetated area (m²) per height interval in vegetation area south. Elevation data: ©Lantmäteriet

Även inom vegetationsområde nord observeras en ökad produktivitet generellt inom hela ekotonen och andelen vegeterad yta för hela perioden har ökat från 7,0 km² (1987) till 9,99 km² (2019) (Tab. 6). NDVI-värdena är överlag lägre här jämfört med vegetationsområde syd då majoriteten av ytan för både 1987 och 2019 har värden mellan 0.3-0.4, dock visar resultatet på en ökning inom denna klass från 65 % år 1987 till 84 % år 2019 (Tab. 6). Områden med högre fotosyntes är mer utspridda här jämfört med vegetationsområde syd och värden i den högsta klassen 0.5-0.6 saknas helt (Fig. 9). År 2007 (Fig. 9d) går det att observera en ökning av NDVI 0.4-0.5 upp mot de högre delarna av området. 1995 (Fig. 9b) och 2015 (Fig. 9e) har återigen lägst värden där 2015 även här sticker ut ytterligare med endast 17 % yta inom klassningen för vegetation.

Tabell 6. Andelen (%) av totalytan som befinner sig inom respektive NDVI-klass samt värden för vegeterad yta i vegetationsområde nord.

Table 6. The proportion (%) of the total area that falls within each NDVI class as well as values for vegetated area in vegetation area north.

År	NDVI -1 (%)	NDVI 0 (%)	NDVI 0.1-0.2 (%)	NDVI 0.2-0.3 (%)	NDVI 0.3-0.4 (%)	NDVI 0.4-0.5 (%)	NDVI 0.5-0.6 (%)	Vegeterad yta NDVI 0.3-0.6 (%)	Vegeterad yta NDVI 0.3-0.6 (m ²)	Vegeterad yta NDVI 0.3-0.6 (km ²)
1987	0,00	1,13	1,50	31,64	64,62	1,11	0,00	65,73	7000200	7,00
1995	0,00	1,61	6,59	54,25	37,15	0,40	0,00	37,55	3998469	4,00
2002	0,00	1,00	0,79	10,88	85,30	2,03	0,00	87,33	9300600	9,30
2007	0,01	1,01	0,63	4,83	79,98	13,54	0,00	93,52	9959400	9,96
2015	0,08	3,03	7,91	71,73	17,21	0,03	0,00	17,24	1836000	1,84
2019	0,01	1,06	0,48	4,68	83,67	10,09	0,00	93,76	9985500	9,99

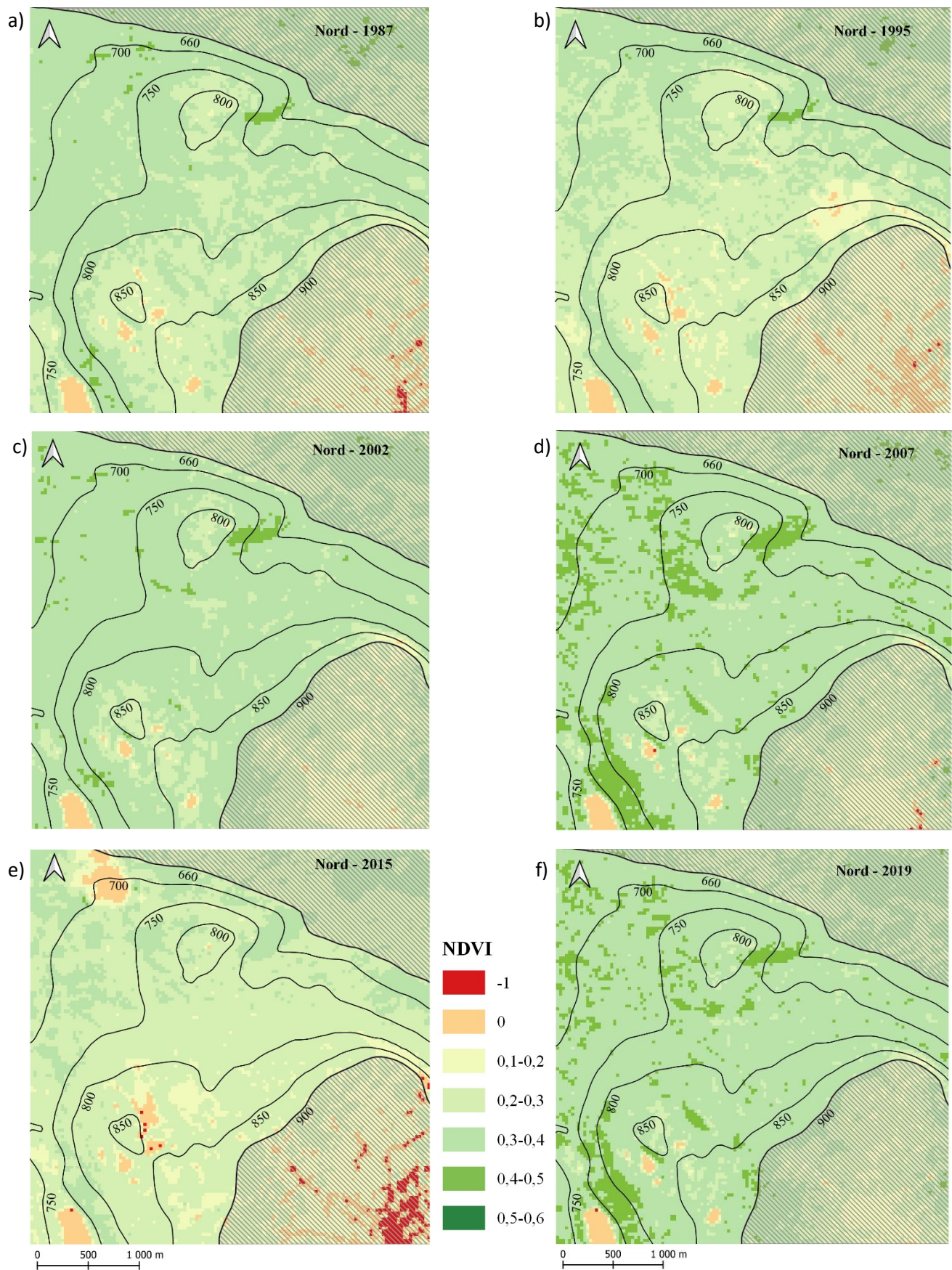
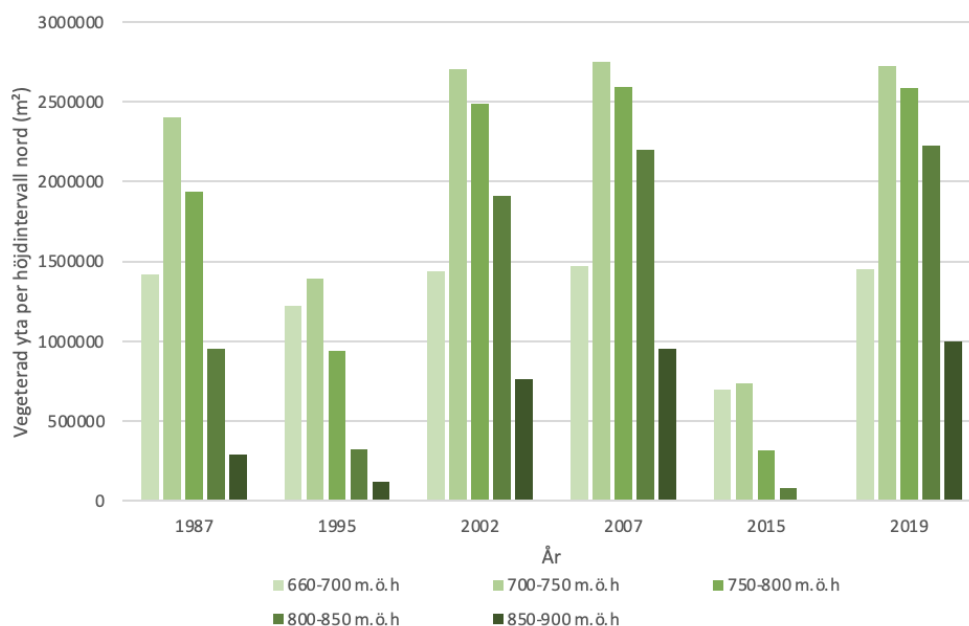


Figure 9.a-f. NDVI index för 1987-2019 i Vegetationsområde nord. Data: Earth Explorer
Figure 9.a-f. NDVI index for 1987-2019 in Vegetation area north. Data: Earth Explorer

Fördelningen av vegeterad yta mellan 660 m.ö.h och 900 m.ö.h i vegetationsområde nord visar även här en ökning av vegeterad yta mot högre höjder (Fig. 10). Inom det högsta höjdintervallet 850-900 m.ö.h var det 289800 m² av vegeterad yta år 1987 och 999000 m² år 2019, vilket motsvarar en ökning på 244 %. Inom detta höjdintervall har värdena för resterande år ökat med tiden med undantag för 1995 och 2015 som båda påvisar lägre värden jämfört med övriga år. Figur ändrad



Figur 10. Vegeterad yta (m²) per höjdintervall i vegetationsområde nord. Höjddata: ©Lantmäteriet

Figure 10. Vegetated area (m²) per height interval in vegetation area north. Elevation data: ©Lantmäteriet

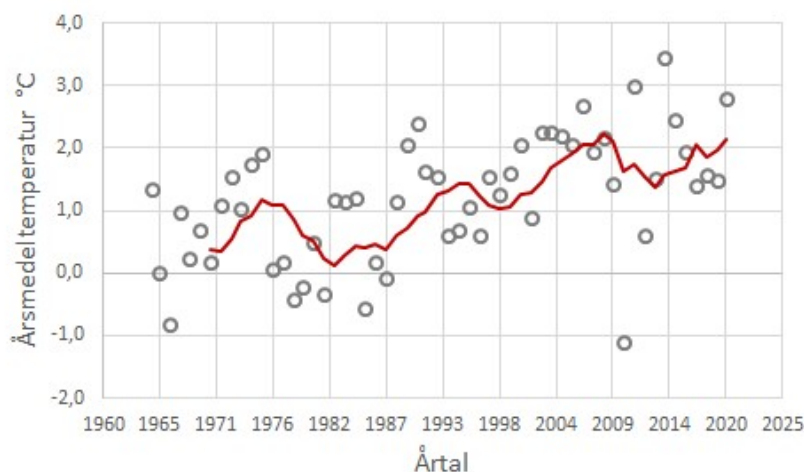
5.3 Klimatanalys

5.3.1 Lufttemperatur

Under perioden 1964-2020 har årsmedeltemperaturen varierat mellan -1,1 °C (2010) och 3,5 °C (2014). Det glidande medelvärde på sju år visar att trenden är stigande med en ökad medeltemperatur på cirka 1,8 °C för hela perioden (Fig. 11). Sommarmedeltemperaturen har under åren 1964 till 2020 pendlat mellan 7,3 °C (1993) och 12,7 °C (2002). Det glidande medelvärde visar på en stigande temperaturökning med cirka 0,5°C (Fig. 12a).

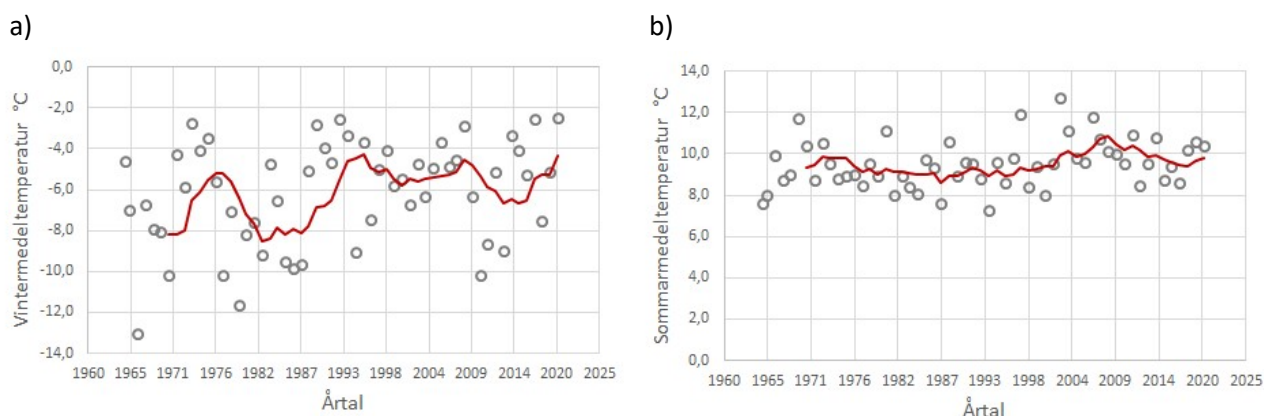
Vintermedeltemperaturen har varierat från -13°C (1966) till -2,5°C (2020) under perioden 1964 till 2020. Det glidande medelvärde på sju år visar att trenden är stigande med en

temperaturökning på cirka 3,5 °C (Fig.12b). Vid jämförelse av temperaturanalyserna går det att urskilja ett samband mellan årsmedeltemperatur och vintermedeltemperatur då dessa glidande medelvärden har mer liknande variationer jämfört med sommarmedeltemperaturen som inte visar lika stora variationer.



Figur 11. Genomsnittlig årstemperatur med ett glidande 7 års medelvärde för 1964-2020 i Åre. Data: SMHI, 2021.

Figure 11. Average annual temperature with a moving 7-year average for 1964-2020 in Åre. Data: SMHI, 2021.

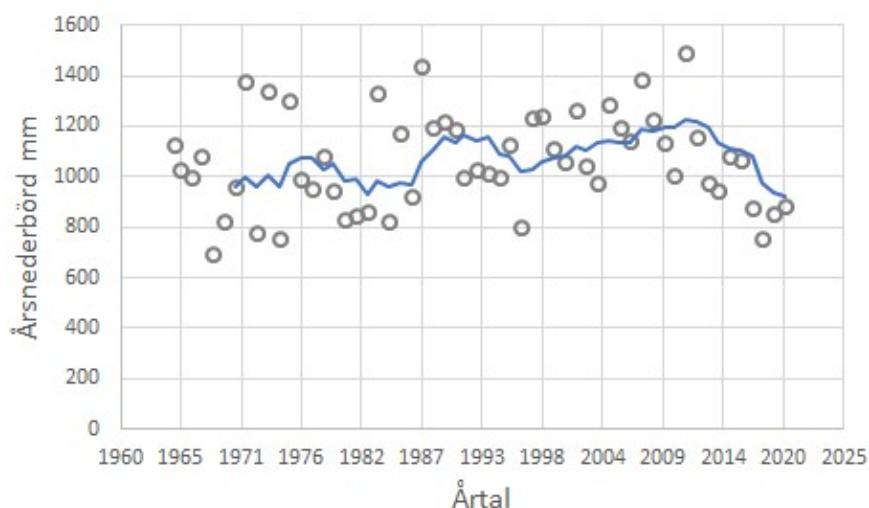


Figur 12. a) Sommarmedeltemperatur med ett glidande 7 årsmedelvärde samt **b)** vintermedeltemperatur med ett glidande 7 års medelvärde i Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

Figure 12. a) Summer average temperature with a moving 7-year average and **b)** winter average temperature with a moving 7-year average in Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

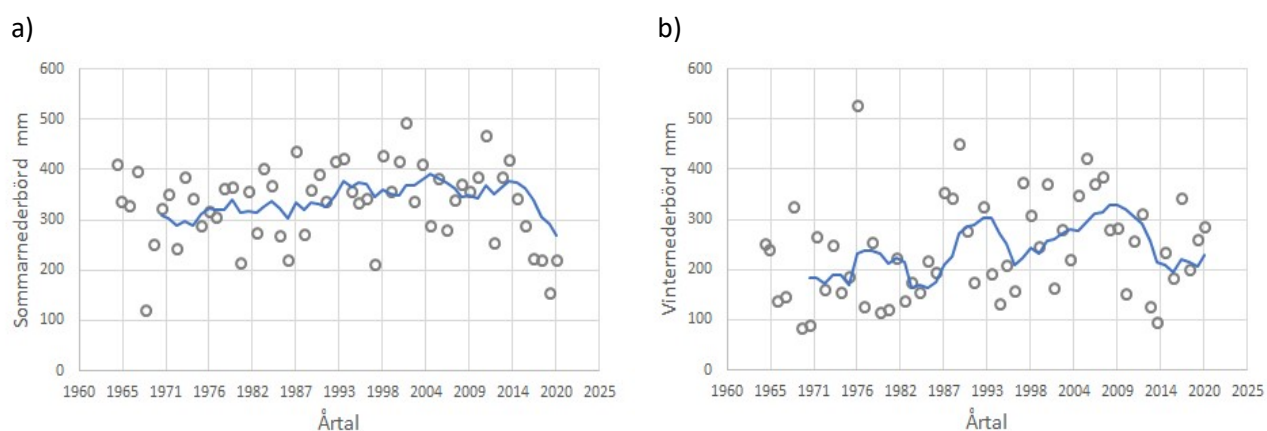
5.3.2 Nederbörd

Årsnederbörden har varierat mellan 698 mm (1968) till 1492 mm (2010). Det glidande medelvärdet på sju år visar på en nedåtgående trend från 2012 med en minskad nederbörd på 50 mm för hela perioden (Fig. 13). Under sommarmånaderna har nederbörden inom perioden varierat från 122 mm (1968) till 495 mm (2001). Det går att se att nederbörden minskat under de senaste åren och det glidande medelvärdet visar på en nedåtgående trend från 2013 med minskad nederbörd på 50 mm år 2020, vilket kan liknas med trenden för årsnederbörd. Vinternederbörden (Fig. 14a) har under perioden 1964-2020 pendlat från 83 mm (1969) till 527 mm (1976). Till skillnad från års- och sommarnederbörd visar det glidande medelvärdet trots stora variationer på en stigande trend de senaste åren med ökad nederbörd på omkring 30 mm för hela perioden (Fig. 14b).



Figur 13. Årlig nederbörd med ett glidande 7 års medelvärde i Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

Figure 13. Annual precipitation with a moving 7-year average in Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

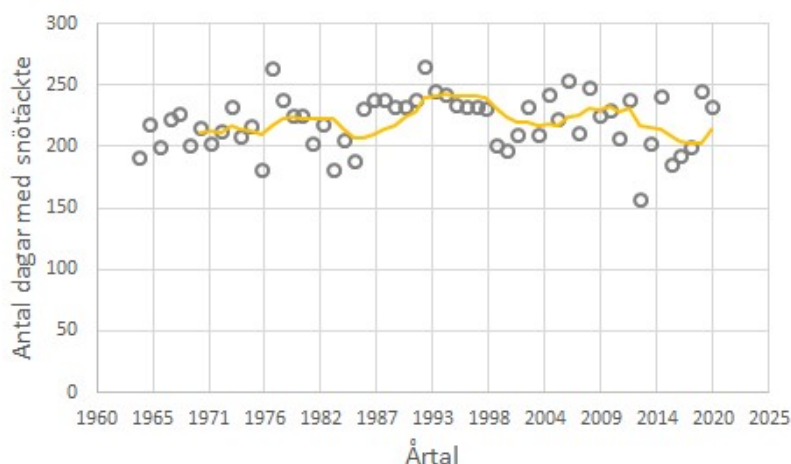


Figur 14. a) Summa nederbörd med ett glidande 7 års medelvärde under sommarmånaderna och **b)** summa nederbörd med ett glidande 7 års medelvärde under vintermånaderna i Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021

Figure 14. a) Total precipitation with a moving 7-year average during the summer months and **b)** total precipitation with a moving 7-year average during the winter months in Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

5.3.4 Snötäcke

Dagar med snötäckt markyta har under perioden 1964-2020 varierat från 157 dagar (2013) till 265 dagar (1992). Det glidande medelvärdet på sju år visar på variationer under hela perioden med en ökad trend från 2017 och en ökning med cirka fem dagar för hela perioden (Fig. 15).



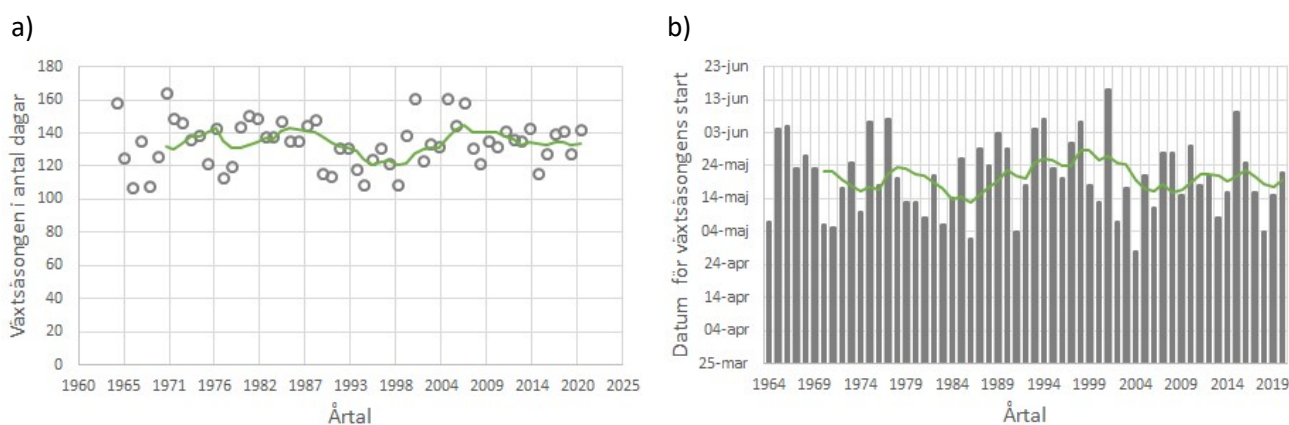
Figur 15. Antal dagar per år med snötäckt markyta under perioden 1964-2020 i Åre. Data: SMHI, 2021.

Figure 15. Number of days with snow-covered ground during the years 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

5.3.5 Växstsäsong

Växstsäsongen har under perioden 1964-2020 varierat mellan 107 dagar (1966) och 164 dagar (1969). Det glidande medelvärdet på sju år visar en nedåtgående trend under 1990-talet med en uppgång på 2000-talet för att sedan plana ut under det senaste decenniet. Under hela perioden observeras en ökning av växstsäsongen med omkring 3 dagar (Fig. 16a).

Växstsäsongens start har varierat stort under studieperioden med första dag den 25 april (2005) och 14 juni (2001). Det glidande medelvärdet visar på en trend där startdatumet tidigareläggs med omkring 5 dagar (Fig. 16b).



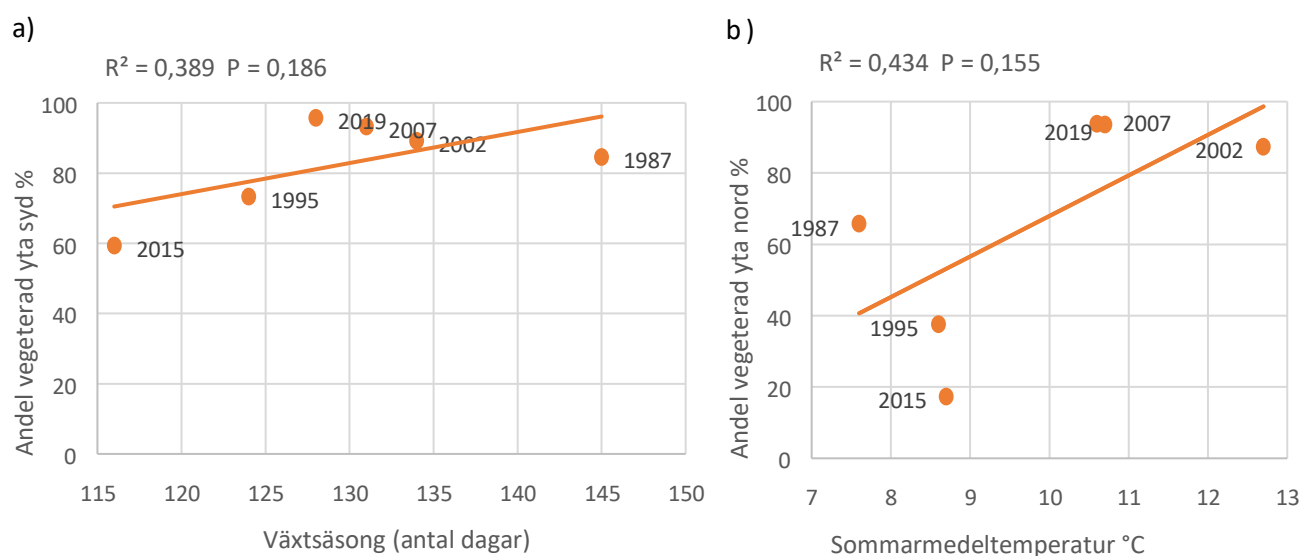
Figur 16. a) Växstsäsongens antal dagar och **b)** växstsäsongens startdatum i Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

Figure 16. a) Number of days in the growing season and **b)** the start date of the growing season in Åre 1964-2020. Data: SMHI, 2021.

5.4 Sambandsanalys

5.4.1 Sambandsanalys med klimatifaktorer motsvarande år

Resultatet av förändringen i andelen vegeterad yta per år (%) analyserat med förändringar i klimatifaktorer för motsvarande år 1987, 1995, 2002, 2007, 2015 och 2019 visade att inom vegetationsområde syd gav faktorn *antal dagar växtsäsong* bäst utfall. Denna analys gav R^2 0,39 ($p=0,19$) (Fig. 17a) vilket indikerar ett svagt samband och att 39 % av förändringen i andelen vegeterad yta mellan åren kan förklaras av växtsäsongen samma år. Resultatet för område nord visade att *antal dagar växtsäsong* fick p-värde 0,23 medan faktorn *sommarmedeltemperatur* gav R^2 0,43 ($p=0,15$) (Fig. 17b). Detta indikerar ett svagt samband och att 43 % av förändringen i andelen vegeterad yta i vegetationsområde nord kan förklaras av sommartemperaturen samma år. Faktorn *årsnederbörd* gav sämst utfall för både syd och nord med p-värden på 0,96 respektive 0,99 vilket innebär att det är 96 respektive 99 % chans att sambandet är en slump.

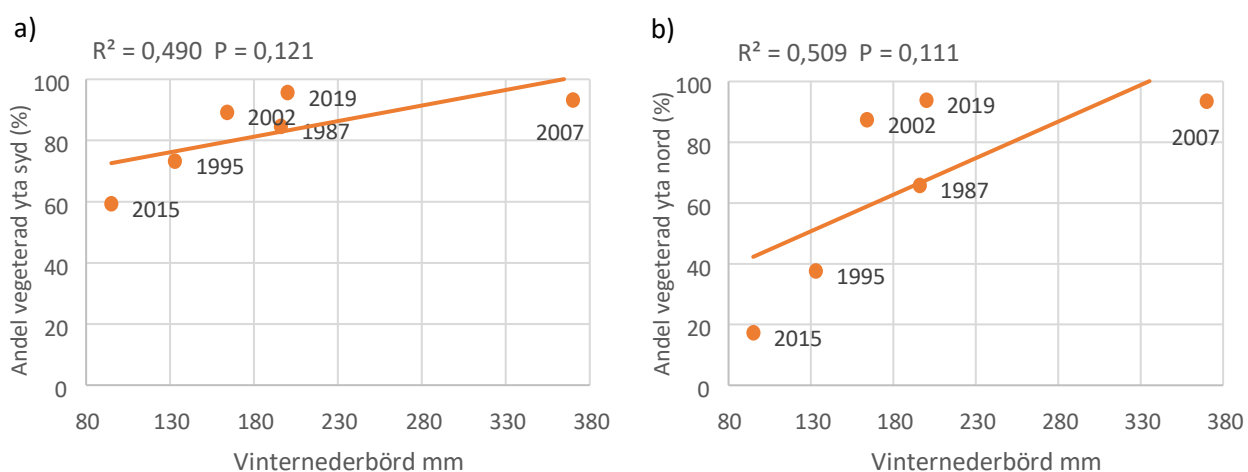


Figur 17. a) Sambandet mellan andel vegeterad yta och antal dagar växtsäsong motsvarande år inom vegetationsområde Syd i åren 1987-2019. **b)** Sambandet mellan andel vegeterad yta och sommarmedeltemperaturen motsvarande år inom vegetationsområde nord mellan 1987-2019. Data: SMHI, 2021.

Figure 17. a) The relationship between the proportion of vegetated area and the number of days of growing season in corresponding year in vegetation area South in the years 1987-2019. **b)** The relationship between the proportion of vegetated area and the summer average temperature in corresponding year in vegetation area north between 1987-2019. Data: SMHI, 2021.

5.4.2 Sambandsanalys med klimatfaktorer året innan

Resultatet av förändringen i andelen vegeterad yta per år (%) analyserat med förändringar i klimatfaktorer året innan, det vill säga för åren 1986, 1994, 2001, 2006, 2014 och 2018, visade att inom vegetationsområde syd gav faktorn vinternederbörd ett nästan signifikant samband med R^2 0,49 ($p = 0,12$). Detta indikerar att 49 % av förändringen i andelen vegeterad yta mellan åren kan förklaras av vinternederbörden föregående år (Fig. 18a). Även inom vegetationsområde nord gav faktorn vinternederbörd ett nästan signifikant samband med R^2 0,50 ($p = 0,11$) vilket indikerar att 50 % av förändringen i andelen vegeterad yta i vegetationsområde nord kan förklaras av vinternederbörden föregående år (Fig. 18b). Faktorn sommarmedeltemperatur föregående år gav sämst utfall inom både syd och nord med p-värden på 0,95 respektive 0,83 vilket innebär att det är 95 respektive 83 % chans att sambandet är en slump.

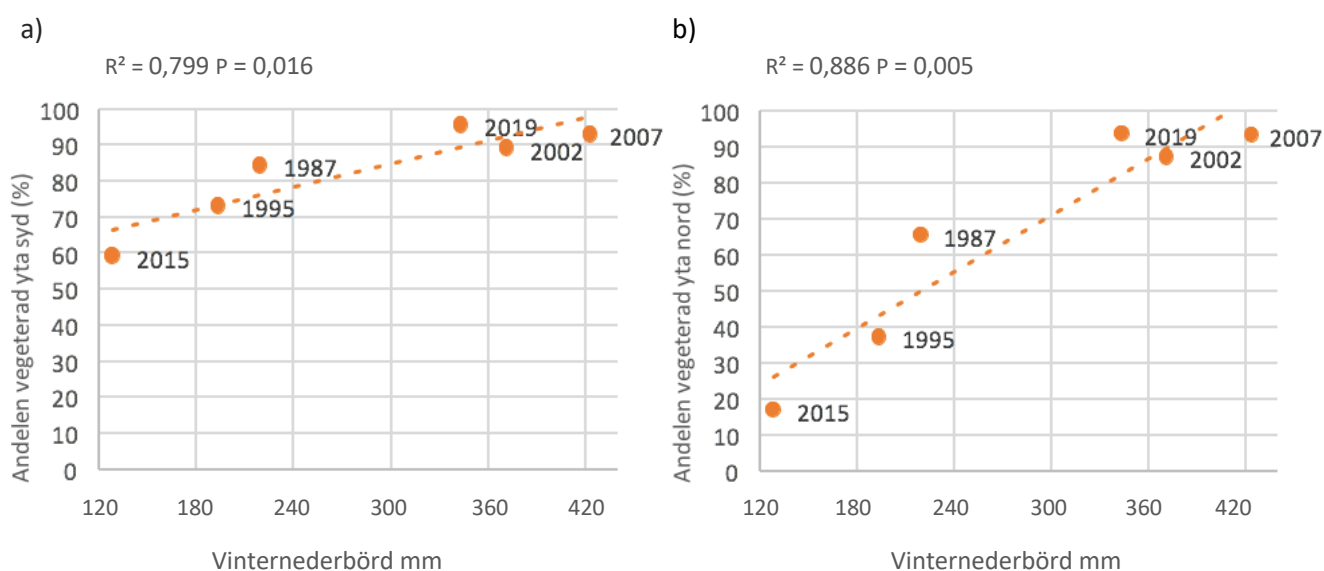


Figur 18. a) Sambandet mellan förändring i andelen vegeterad yta inom vegetationsområde syd mellan 1987-2019 och värden för vinternederbörden från föregående år. **b)** Sambandet mellan förändring i andelen vegeterad yta inom vegetationsområde nord mellan 1987-2019 och vinternederbörden från föregående år. Data: SMHI, 2021.

Figure 18. a) The relationship between the change in the proportion of vegetated area within the vegetation area south between 1987-2019 and the values for the winter precipitation from the previous year. **b)** The relationship between the change in the proportion of vegetated area in the vegetation area north between 1987-2019 and the winter precipitation from the previous year. Data: SMHI, 2021.

5.4.3 Sambandsanalys med klimatfaktorer två år innan

Resultatet av förändringen i andelen vegeterad yta per år (%) analyserat med förändringar i klimatfaktorer två år innan, det vill säga för åren 1985, 1993, 2000, 2005, 2013, 2017 gav för vegetationsområde syd ett signifikant samband med faktorn *vinternederbörd*. Denna analys gav R^2 0,80 ($p=0,02$) vilket indikerar att 80 % av förändringen i andelen vegeterad yta mellan åren kan förklaras av vinternederbörden två år innan (Fig. 19a). Även vegetationsområde nord gav ett signifikant samband med faktorn *vinternederbörd* med R^2 0,88 ($p=0,005$) (Fig. 19b), vilket indikerar att 88 % av förändringen i andelen vegeterad yta i vegetationsområde nord kan förklaras av vinternederbörden två år innan. Den faktor som gav sämst utfall för både syd och nord var *sommarmedeltemperatur* med p-värden på 0,99 respektive 0,83.



Figur 19. a) Sambandet mellan förändring i andelen vegeterad yta och vinternederbördsvärden från två år innan inom vegetationsområde syd mellan 1987-2019 och **b)** Sambandet mellan förändring i andelen vegeterad yta och vinternederbördsvärden från två år innan inom vegetationsområde nord mellan 1987-2019. Data: SMHI, 2021.

Figure 19. a) The relationship between change in the proportion of vegetated area and winter precipitation values from two years before in vegetation area south between 1987-2019 and **b)** The relationship between change in the proportion of vegetated area and winter precipitation values from two years before in vegetation area north between 1987-2019. Data: SMHI, 2021.

6. Diskussion

Vår studie visar att båda Åreskutans sluttningar har observerade förändringar av trädgränsen under perioden 1965-2019 och trenden hos bägge visar på en generellt högre liggande trädgräns år 2019 jämfört med 1965. Detta överensstämmer med tidigare observationer som pekar på en uppåtgående trädgränsförflyttning (Harsch, 2009; Kullman & Öberg, 2015; Aune et.al, 2011). Vid jämförelse av de båda sluttningarna går det att observera att trädgränsen sträcker sig högre upp på den södra sluttningen jämfört med den norra vilket stämmer överens med Kjällgren & Kullmans (2002) observationer om att trädgränsen generellt sträcker sig högre på sydsluttningar jämfört med nordsluttningar. Enligt Treml & Banas (2008) kan detta bero på att vegetationens tillväxt gynnas av branta sydsluttningar på grund av deras optimala solinstrålning. Den mänskliga påverkan som Cudlín et al. (2017) menar kan ha stort inflytande på trädgränsens expanderings observeras dock i nästan hela det södra området med tillkomsten av ett antal nedfarter och vägar. I en av ravinerna på den södra sluttningen kunde det också observeras ett jordskred som möjligen föranlett till att ett av de högst identifierade träden från 1965 inte längre fanns kvar år 2019 vilket även Holtmeier (2009) nämner som en retirerande faktor.

I båda sluttningarna observeras även en ökad produktivitet generellt inom hela ekotonen från år 1987 till år 2019. Detta stämmer överens med bland annat Sturm et al. (2001) som observerat en ökad densitet av buskage i Alaska som ett svar på temperaturökningen samt Hedenås et al. (2016) som observerat en ökad densitet av träd inom ekotonen i Sverige. Även ekotonens vegeterade yta inom 850-900 m.ö.h har ökat för hela perioden på båda sluttningarna vilket indikerar en utbredning av vegetationen upp på fjället. Vid jämförelse mellan sluttningarna går det att observera att ekotonens vegetation även den sträcker sig högre upp på fjället på den södra sluttningen jämfört med den norra. Detta trots den utspridda mänskliga aktivitet som råder i vegetationsområde syd vilket indikerar på att det i detta fall även är andra faktorer som styr. Vegetationsområde nord är präglad av flackare terräng och en del våtmark vilket skulle kunna hämma utbredningen av träd och växtlighet, dock går det inte att direkt urskilja dessa våtmarker i NDVI-kartorna. En annan förklaringsfaktor kan vara det Kjällgren & Kullman (2002) och Treml & Banas (2008) menar med att vegetationens tillväxt gynnas av branta sydsluttningar. Den norra sluttningen som saknar en påtaglig mänsklig närvaro har under studieperioden dock upplevt en större förändring än den södra sluttningen vilket gör att det kan resoneras kring om produktiviteten på den södra sluttningen kunnat vara ännu högre om det inte vore för skidsystemet.

Sambandsanalyserna mellan vegetationsförändringarna inom ekotonen och klimatfaktorer visade på att det största sambandet fanns mellan förändring i den vegeterade ytan och vinternederbörd både ett och två år tillbaka. Detta stämmer överens med studier av bland annat Kullman & Öberg (2009) och Aune et al. (2011) som pekar på att tillväxten av trädgränsen varit som mest framträdande i regioner med hög vinternederbörd och på de platser där snötäcket ligger tjockt och kan skydda och isolera växterna. Åren med högst produktivitet var 2007 och 2019 på båda sluttningarna. Vid jämförelse av klimatfaktorerna under samma period uppvisar de båda åren liknande sommar- och vintertemperaturer, medan 2007 uppvisar både högre sommar- och vinternederbörd. Å andra sidan hade 2019 fler dagar med snötäcke (34 dagar) och då Körner (2012) menar att boreala trädgränser kan dra nytta av snösmältning i början av en relativt kort växtsäsong kan det därför antas att marken 2019 ändå varit fuktig inför växtsäsongen. Detta kan ses som en indikation på att både nederbörd och snötäcke kan vara framträdande faktorer och att de kanske inte nödvändigtvis behöver verka i kombination för en ökad tillväxt. År 2015 observeras en minskad fotosyntes vilket dels skulle kunna förklaras med att satellitdata från 2015 är insamlad tidigare på säsongen (2 juli) i kombination med att växtsäsongen hade ett relativt sent startdatum (9 juni). År 2015 var även ett år präglad av relativt lite vinternederbörd samt kalla vinter- och sommartemperaturer. De två föregående åren 2013 och 2014 uppvisar extremt låg vinternederbörd och få dagar med snötäckt markyta. Att år 2015 samt föregående år 2013 och 2014 haft låg vinternederbördsmängd skulle därför också kunna förklara varför 2015 påvisar låga NDVI-värden med låg produktivitet. Mellan 1995 och 2002 kan det på båda sluttningarna observeras ett skifte mot högre produktivitet. Detta skulle kunna förklaras med den ökning i årsmedeltemperatur som kan observeras under 1990-talet. Vid jämförelse av klimatfaktorerna uppvisar dessutom år 1995 låga sommar- och vintertemperaturer, kort växtsäsong och låg vinternederbördsmängd. År 2002 uppvisar å andra sidan hög sommartemperatur och hög vinternederbörd. Relaterat till tidigare nämnda studier skulle då den ökade produktiviteten år 2002 även här kunna förklaras av den höga vinternederbördsmängden. Mellan studieperiodens start och slut har produktiviteten generellt ökat inom hela ekotonen och vid jämförelse av förändringarna i klimatfaktorer under samma period visar trenden på ökade temperaturer under både sommar och vinter, minskad sommarnederbörd och ökad vinternederbörd. Tittat på helheten kan det sammanfattningsvis observeras en koppling mellan tillväxt och, förutom vinternederbörd, också sommartemperaturer, växtsäsong och snötäcke. Detta stämmer även överens med Hallinger et al. (2010) som observerat en korrelation mellan buskexpansion i Abisko och varma somrar och snötäcke.

En ökad uppvärmning antas på många håll leda till att den temperaturkänsliga övergångszonen mellan borealskog och tundra inom både arktiska och subarktiska områden kommer att avancera till allt högre höjder och nordligare breddgrader och bevisligen har en expansion av trädgränsen och därmed ekotonen redan skett på flertalet håll. Trots att klimatet generellt kan anses som en avgörande faktor för ekotonens expansion verkar åsikterna gå isär om till vilken grad och vilken faktor av klimatförändringarna som egentligen är drivande. Dessutom visar de flesta studier att sambanden mellan drivande mekanismer på lokal nivå är komplexa och att klimatuppvärmningen inte ensamt är den dominerande kraften. Denna komplexitet återspeglas i resultatet av denna studie som förutom ett signifikant samband med vinternederbörden även fann observerade samband med sommartemperatur, växtsäsong och snötäcke. Studien i sig förstärker därför tanken om att de förklarande faktorerna till vegetationsförändringarna är många och att det är viktigt att se den komplexa helheten. För full förståelse för orsaken bakom de observerade förändringarna bör fortsatta studier förutom att ha ett tätare årsintervall och inkludera ytterligare vegetationsanalyser även inkludera fler variabler som bland annat rennäring, markanvändning, markprocesser och insektsutbrott. På platser som Åre där trädgränsen klättrar uppåt bör vidare studier även undersöka konsekvenserna av vad förlust av kalvfjäll innebär för både människa och natur.

7. Slutsatser

Trädgränsen och ekotones position på Åreskutans sluttningar styrs av ett komplext samband mellan olika klimatfaktorer, topografi och geologiska förutsättningar. Variationer inom ekotonen kan under studieperioden ses genom en avancerad trädgräns, ökad produktivitet samt en utbredning av vegetationen upp på fjället. Vid jämförelse av de båda sluttningarna går det att observera att både trädgränsen och den vegeterade ytan sträcker sig högre upp på fjället på den södra sluttningen jämfört med den norra. Under studieperioden har den norra sluttningen upplevt en större förändring av både den totala vegeterade ytan och andel vegeterad yta inom 850-900 m.ö.h. Samband mellan förändringar i skogs-tundra ekotonen kunde urskiljas med snötäcke, växtsäsong och sommartemperatur samt markanvändning och markprocesser men det största sambandet kunde ses med vinternederbörden från både föregående år och två år innan. Både klimatanalysen för Åre och globala klimatmodeller visar på en fortsatt ökning av vinternederbörden i norra Europa (Collins et al. 2013; Hoegh-Guldberg et al. 2018) och i kombination med varmare temperaturer skulle detta således kunna leda till en ännu snabbare förtätning och utbredning av skogs-tundra ekotonen.

8. Referenser

- Bengtsson S, (2007). *Förändringsanalys i ortofoton*. (Masteruppsats, Kungliga tekniska högskolan). ISRN KTH/GIT/EX--07/002-SE.
<http://www.divaportal.se/smash/get/diva2:1065422/FULLTEXT01.pdf>
- Bergman, S., Stephens, M.B., Andersson, J., Kathol, B. & Bergman, T. (2012). *Sveriges berggrund, skala 1:1 miljon*. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning.
<http://resource.sgu.se/produkter/k/k423-karta.pdf>
- Aune S, Hofgaard A, Söderström L. (2011). Contrasting climate- and land-usedriventree encroachment patterns of subarctic tundra in northern Norway and the Kola Peninsula. *Canadian Journal of Forest Research*, 41 (3), 437–449. <https://doi.org/10.1139/X10-086>
- Callaghan, T.V., C. Jonasson, T. Thierfelder, Z. Yang, H. Hedenås, M. Johansson, U. Molau, R. Van Bogaert, A. Michelsen, J. Olofsson, D. Gwynn-Jones, S. Bokhorst, G. Phoenix, J. W. Bjerke, H. Tømmervik, T.R. Christensen, E. Hanna, E. K. Koller, and V.L. Sloan. (2013). Ecosystem change and stability over multiple decades in the Swedish subarctic: complex processes and multiple drivers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368 (1624).
<https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0488>
- Cederbom, C, Andersson, M, Kiilsgaard, R & Van Well, L. (2015). *Slamströmmar i samband med intensiv nederbörd. Studie för optimerad nytta av varningsinformation för väderhändelser*. Linköping: Statens Geotekniska Institut.
<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/sgi-publikation/sgi-p25.pdf>
- Chen, J., Jönsson, P., Tamurab, M., Gu, Z., Matsushita, B & Eklundh, L. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sensing of Environment*. 91 (3–4), 332–344.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cudlín, P., Klopčič, M., Tognetti, R., Máliš, F., Alados, C. L., Bebi, P., ... Wielgolaski, F. E. (2017). Drivers of treeline shift in different European mountains. *Climate Research*, 73(12), 135–150. <https://doi.org/10.3354/cr01465>
- Earth observing system. (u.å.). NDVI. Hämtad 2021-05-01. <https://eos.com/ndvi/>

Guo, W., Rees, G. & Hofgaard, A. (2020). Delineation of the forest-tundra ecotone using texture-based classification of satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 41 (16), 6384–6408. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1734254>

Hagedorn, F., Shiyatov, S.G., Mazepa, V.S. et al. (2014). Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? *Global Change Biology*, 20 (11), 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

Hallinger, M., Manthey, M. & Wilmking, M. (2010). Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phytologist*, 186 (4), 890–899. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03223.x>

Harsch, M.A., Hulme, P.E., McGlone, M.S., Duncan, R.P. (2009). Are treelines advancing? a global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12 (10), 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/j.14610248.2009.01355.x>

Hedenås, H., Christensen, P. & Svensson, J. (2016). Changes in vegetation cover and composition in the Swedish mountain region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (452). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5457-2>

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: *Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems*. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Hofgaard, A. Rees, G. Hanssen, F. Tømmervik, H. (2012). Latitudinal forest advance in northernmost Norway since the early 20th century. *Journal of Biogeography* 40 (5), 938–949. <https://doi.org/10.1111/jbi.12053>

Holtmeier, F.K. (2009). *Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics*, 2nd edn. *Advances in Global Change Research* 36. Dordrecht: Springer Science & Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9705-8>

Holtmeier, F.K. & Broll, G. (2005). Sensitivity and response of Northern Hemisphere elevational and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14 (5), 395–410. <https://doi.org/10.1111/j.1466822X.2005.00168.x>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kaplan, J.O. & New, M. (2006). Arctic climate change with a 2 °C global warming: timing, climate patterns and vegetation change. *Climatic Change*, 79 (3), 213–241.
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-9113-7>

Kjällgren, L & Kullman, L. (2002). Geographical patterns of tree-limits of Norway spruce and Scots pine in the southern Swedish Scandes. *Norsk Geografisk Tidsskrift*. 56(4) 237-245,
<https://doi.org/10.1080/00291950210002441>

Kullman, L. & Öberg, L. (2015). *Trädgräns i fjällen. Sammanställning och utvärdering av en metodstudie för klimatrelaterad miljöövervakning* (Rapport 502-1091-2015). Länsstyrelsen Jämtlands län.
<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.4e0415ee166afb59324fd91/1541671140450/Tradgrans-i-fjallen-webb.pdf>

Kullman, L. & Öberg, L. (2009). Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. *Journal of Ecology*, 97 (3), 415–429.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01488.x>

Körner, C. (2012) *Alpine Treelines. Functional ecology of the global high elevation tree limits*. Springer, Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0396-0>

Körner, C. & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31(5), 713–732.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>

Lantmäteriet. (2020). *Produktbeskrivning: Ortofoto. DOKUMENTVERSION: 3.7*.
<https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/flyg--ochsatellitbilder/ortofoto.pdf>

Larsen, J.N., O.A. Anisimov, A. Constable, A.B. Hollowed, N. Maynard, P. Prestrud, T.D. Prowse, and J.M.R. Stone, 2014: *Polar regions*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1567-1612.

Loock, J. (2009). *Förändringarnas Åre. Kulturhistorisk landskapsanalys av riksintresset Åredalen*. <https://docplayer.se/5275534-Forandringarnas-are-kulturhistorisklandskapsanalys-av-riksintresset-aredalen.html>

- Länsstyrelsen Jämtlands län. (2017). *Åreälven med biflöden SE0720286 Fördjupad bevarandeplan för Natura 2000-område* (2018:20).
<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.4e0415ee166afb5932429421/1543418280931/%C3%85re%C3%A4lven%20med%20bifl%C3%B6den%20SE0720286%20f%C3%B6rdjupad.pdf>
- Moen, J., K. Aune, L. Edenius, & A. Angerbjörn. (2004). Potential Effects of Climate Change on Treeline Position in the Swedish Mountains. *Ecology and Society*, 9 (1): 16.
<https://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art16/>
- Naturvårdsverket. (2020a). *Nationella marktäckedata 2018 - basskikt. Produktbeskrivning*.
<https://www.naturvardsverket.se/upload/sa-mar-miljon/kartor/NMD-ProduktbeskrNMD2018Basskikt-v2-2.pdf>
- Naturvårdsverket. (2020b). *Nationella marktäckedata 2018 - tilläggsskikt Låg fjällskog. Produktbeskrivning*. https://gpt.vic-metria.nu/data/land/NMD/NMD_Produktbeskrivning_tillaggsskikt_LagFjallskog_v1_1.pdf
- Rafstedt, T. (1984). *Fjällens vegetation: Jämtlands län*. Naturvårdsverket & Jämtlands län.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1172413/FULLTEXT01.pdf>
- Rees, W.G., Hofgaard, A., Boudreau, S., Cairns, D.M., Harper, K., Mamet, S., Mathisen, I., Swirad, Z & Tutubalina, O. (2020). Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change?. *Global Change Biology*, 26(7), 3965-3977. <https://doi.org/10.1111/gcb.15113>
- SGU. (2017). *Sveriges berggrund HUR, VAR och NÄR*.
<http://resource.sgu.se/produkter/broschyrrer/sveriges-berggrund-broschyr-nov2017webb.pdf>
- SMHI. (2021a). *Kunskapsbanken. Vegetationsperiod*.
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/fenologi/vegetationsperiod-1.6270>
- SMHI. (2021b). *Meteorologi. Dataserier med normalvärden*.
<https://www.smhi.se/data/meteorologi/dataserier-med-normalvarden-for-perioden-1991-2020-1.167775>
- SMHI. (2021c). *Meteorologi. Varför är det kallt uppe på berg*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/varfor-ar-det-kallt-uppe-pa-berg1.5844>
- SMHI. (2020). *Klimatindikatorer-vegetationsperiodens längd*.
<https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikatorvegetationsperiodens-langd-1.7887>
- SMHI. (2009). *Kunskapsbanken. Klimatet i sveriges landskap/jämtlands klimat*.
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimatet-i-sveriges-landskap/jamtlands-klimat1.4996>

SMHI. (u.å.). *Meteorologi. Snödjup och markytans tillstånd (dygn)*. Hämtad 2021-04-10. <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiskaobservationer#param=snowDepth,stations=all,stations=132240>

Sturm, M., Racine, C. & Tape, K. (2001). Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411, 546–547. <https://doi.org/10.1038/35079180>

Truong, C. Palmé, A. E. & Felber, F. (2007). Recent invasion of the mountain birch *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* above the treeline due to climate change: genetic and ecological study in northern Sweden. *Journal of Evolutionary Biology*, 20(1), 369-380. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2006.01190.x>

Treml, V & Banas, M. (2008). The Effect of Exposure on Alpine Treeline Position: a Case Study from the High Sudetes, Czech Republic. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(4)751–760. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(07-060\)\[TREML\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(07-060)[TREML]2.0.CO;2)

Truong, C. Palmé, A. E. & Felber, F. (2007). Recent invasion of the mountain birch *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* above the treeline due to climate change: genetic and ecological study in northern Sweden. *Journal of Evolutionary Biology*, 20(1), 369-380. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2006.01190.x>

USGS. (u.å.). *Landsat Missions*. Hämtad 2021-05-05. https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-1?qtscience_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con

Van Bogaert, R., Haneca, K., Hoogesteger, J., Jonasson, C., De Dapper, M. & Callaghan, T, V (2011). A century of tree line changes in sub-Arctic Sweden shows local and regional variability and only a minor influence of 20th century climate warming. *Journal of Biogeography*, 38(5), 907–921. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02453.x>

Wu, D., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Huang, K., Tang, B & Zhao, W (2015). Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 21(9), 3520-3531. <https://doi.org/10.1111/gcb.12945>

Öberg, L. (2008). *Trädgränsen som indikator för ekologiska klimateffekter i fjällen*. Naturvårdsverket. (Miljö/Fiske, Miljöövervakning: 2008:01). <http://naturvardsverket.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A864001&dswid=4998>